DER EINFLUSS DES DIOPSIDS AUF DEN FOIDHALTIGEN BEREICH DES BOWENSCHEN RESIDUALSYSTEMS BEI 1, 4, UND 7 KB H_2O-DRUCK.

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von
Ali Reza Fattahi-Meibodi
aus Teheran / Iran

Göttingen 1974

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41534919_0065

DER EINFLUSS DES DIOPSIDS AUF DEN FOIDHALTIGEN BEREICH DES BOWENSCHEN RESIDUALSYSTEMS BEI 1, 4, UND 7 KB H_2O-DRUCK.

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von
Ali Reza Fattahi Meibodi
aus Teheran / Iran

Göttingen 1974

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

D7

Referent: Prof. Dr. H.G.F. Winkler

Korreferent: Prof. Dr. H. Wedepohl

Tag der mündlichen Prüfung: 1. November 1974

Inhaltsverzeichnis

		Seite
I.	Einleitung, Problemstellung	1
II.	Ausgangsmaterialien	7
III.	Experimentelles	9
IV.	Untersuchungen im System Qz-Ne-Ks-H_2O	9
	1) Das System Ab-Ne-H_2O	10
	2) Das System Ab-Or-Ks-Ne-H_2O	13
	3) Bestimmung des H_2O-Druckes, bei dem erstmalig das Eutektikum auftritt	20
V.	Untersuchungen im System Di-Qz-Ne-Ks-H_2O	24
	1) Untersuchungen im System Di-Ab-Ne-H_2O	25
	2) Untersuchungen im System Di-$Ab_{70}Or_{30}$-$Ne_{69}Ks_{31}$-H_2O	29
VI.	Phasenbeziehungen im untersättigten Teil des Systems Di-Qz-Ne-Ks-H_2O bei 1, 4 und 7 kb	33
VII.	Zusammenfassung	39
VIII.	Literatur	42
	Anhang / Tabellen	I - XIII

Abkürzungen:

Ab	= Albit
Alk.Fsp.	= Alkalifeldspat
Alk.Fsp. (1)	= Ab-reicher Alkalifeldspat
Alk.Fsp. (2)	= Or-reicher Alkalifeldspat
Anl	= Analcim
Di	= Diopsid
Ne	= Nephelin
Ne_{ss}	= Nephelin-Mischkristall
L	= Schmelze
V	= Gasphase

zur Tabelle 1:

Dp.	= Durchstoßpunkt
R.	= Reaktionspunkt
E.	= Eutektikum
M.	= Minimum

I. Einleitung, Problemstellung

Ein für die Petrogenese vieler magmatischer Gesteine wichtiges System ist das von BOWEN (1937) bei 1 Atmosphäre untersuchte System $NaAlSiO_4$-$KAlSiO_4$-SiO_2, welches als Bowensches Residualsystem bekannt geworden ist. In diesem System lassen sich die Zusammensetzungen jener Plutonite und Vulkanite darstellen, die aus Alkalifeldspat, Foid oder Quarz bestehen, wie Foidsyenite (früher Foyaite genannt), Syenite und Alkalifeldspat-Granite. Die Darstellung der hellen Gemengteile dieser Gesteine im Residualsystem hat dazu gedient, die Korrespondenz zwischen der Gesteinszusammensetzung und experimentell bestimmten Niedrigtemperatur-Zusammensetzungen in diesem System zu demonstrieren, wie es TUTTLE & BOWEN (1958); LUTH, JAHNS & TUTTLE (1964) für Granite und HAMILTON & MACKENZIE (1965) für Alkalifeldspatsyenite und Foidsyenite getan haben. Jedoch zeigt die Abweichung der Häufigkeitsverteilung jener Gesteine von der Lage der Minima bzw. Eutektika im System Qz-Ne-Ks, daß ihre Genese allein anhand des Bowenschen Residualsystems ohne Berücksichtigung der in diesen Gesteinen vorhandenen mafischen Gemengteile und des in den Feldspäten enthaltenen Anorthits nicht verstanden werden kann.

Der Einfluß von Anorthit auf den "granitischen", d.h. SiO_2-übersättigten Teil des Bowenschen Residualsystems wurde von v.PLATEN (1965), WINKLER (1967), WINKLER & LINDEMANN (1972) und WINKLER (1974) untersucht.

WATT (1966) analysierte 81 Syenite des Gardargebietes in Grönland. Er zeigt, daß bei diesen Gesteinen ein starkes Häufigkeitsmaximum bei Or_{40} auf der Ab-Or-Verbindungslinie im Residualsystem vorliegt, während das Minimum bzw. Eutektikum zwischen Albit und Kalifeldspat sich von Or_{35} (bei 1 Atmosphäre) bis Or_{28} (bei 5 kb) verschiebt.

Nach Ansicht von MORSE (1968) kann die An-Komponente der Feldspäte in Syeniten allein nur eine geringe Verschiebung des Häufigkeitsmaximums verursachen (die Feldspäte in Syeniten haben etwa 10 Gew.% An). Daher nahm er folgendes an:

> "The persistent syenitic maximum near Or_{40} suggests a crystal = liquid control, and this is propably generated by the confluence of the boundary surfaces of plagioclase, ferroaugite, fayalitic olivine, Fe-Ti-oxide, and liquid. Although the calcic pyroxene might be expected to be dominant in this respect because of its stabilisation of Ca-bearing plagioclase in place of pure albite (SCHAIRER & YODER, 1960), preliminary experiments in the system diopside - albite - orthoclase (see below) suggest movement of the trace of the feldspar minimum in the right direction (in Richtung Or_{40}) but somewhat short of the required magnitude."

Im SiO_2-untersättigten Teil des Residualsystems ist, im Gegensatz zu dem SiO_2-gesättigten bzw. übersättigten Teil, eine Verschiebung des Häufigkeitsmaximums der Foidsyenite und Phonolite von dem Minimum bzw. Eutektikum zur K-reicheren Seite nicht festzustellen (HAMILTON & MACKENZIE, 1965; WATT, 1966), sondern nur eine Verlagerung zum foidreicheren Teil jenseits der Phasengrenze zwischen den Kristallisationsfeldern der Alkalifeldspäte und Nephelin-Mischkristalle.

Der Foidgehalt von Foidsyeniten zeigt nach WATT (1966) und STRECKEISEN (1967) zwei Häufigkeitsmaxima, nämlich bei 15-20 Gew.% und bei 30-40 Gew.% Foid. Aber es gibt auch viele Foidsyenite, welche 40-50 Gew.% Foid enthalten. Der maximale Foidgehalt, der durch Kristallisationsdifferentiation eines syenitischen Magmas aufgrund des Residualsystems denkbar ist, kann (wegen des Temperaturtales zwischen den Kristallisationsfeldern der Alkalifeldspäte und der

Nephelin-Mischkristalle im Bowenschen Residualsystem) bei 1 kb nur ca. 30 Gew.% und bei 5 kb nur ca. 35 Gew.% betragen. Zum Verständnis der Genese foidreicherer Gesteine erscheint es daher unerläßlich, daß man Kristall-Schmelze-Gleichgewichte nicht nur zwischen Alkalifeldspäten und Foid, sondern auch bei Gegenwart von mafischen Gemengteilen untersucht. Stellvertretend für mafische Gemengteile wollen wir Diopsid einsetzen.

Die Bedeutung des Diopsids für den SiO_2-untersättigten Teil des Residualsystems ist auch bereits von SOOD, PLATT & EDGAR (1970) und GUPTA (1973) herausgestellt worden. Sie untersuchten Schnitte im System Di-Ab-Or-Ks-Ne bei dem Druck von 1 Atmosphäre. Da aber der Prozeß der fraktionierten Kristallisationsdifferentiation von Magmen in unterschiedlichen Tiefen, also unter Druck, erfolgen muß, bestand unsere Aufgabe darin, das System Di-Ab-Or-Ks-Ne-H_2O bei verschiedenen Drucken zu untersuchen.

Die Aufgabe dieser Arbeit gliedert sich daher folgendermaßen: Im ersten Teil wird das diopsidfreie System behandelt, wobei die aus der Literatur zur Verfügung stehenden Daten zunächst dargestellt werden. Einige experimentelle Untersuchungen im diopsidfreien System wurden ausgeführt, um den Anschluß an bisherige Arbeiten anderer Autoren methodisch sicherzustellen. In einem zweiten Teil werden Experimente in dem genannten, SiO_2-untersättigten und diopsidhaltigen System bei 1, 4 und 7 kb durchgeführt, wobei speziell die Phasenbeziehungen im kotektischen Bereich der Systeme Di-Ab-Ne-H_2O und Di-$Ab_{70}Or_{30}$-$Ne_{69}Ks_{31}$-H_2O untersucht werden.

Das System Di-Ab-Or-Ks-Ne-H_2O ist ein Teil innerhalb des Systems Di-Ks-Ne-Qz-H_2O*. Dieses kann in Form eines Tetraeders dargestellt werden, wenn Wasser immer im Überschuß vorhanden ist und deshalb in der Darstellung nicht berücksichtigt zu werden braucht. Die Basisfläche dieses Tetraeders besteht aus Qz, Ks und Ne und die Spitze aus Diopsid. Aber exakt ist das nicht richtig; denn infolge des Auftretens einer komplizierten Phasenbeziehung zwischen Diopsid und Albit, die zu Plagioklas-Mischkristallbildung führt, muß genaugenommen das 7-Komponentensystem K_2O-Na_2O-CaO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O betrachtet werden. Die Wahl eines 5-Komponentensystems (Tetraeder + H_2O) verursacht in der Darstellung eine allgemeine Reduzierung der Phasenbeziehungen um zwei Freiheitsgrade. So stellt z.B. ein isobar invarianter Punkt bzw. eine univariante Linie in diesem System in Wirklichkeit ein isobar bivariantes bzw. ein isobar trivariantes Gleichgewicht und damit in der Darstellung eine Ebene bzw. einen Raum dar. Die Tetraederdarstellung ist also nur eine Vereinfachung des in Wirklichkeit aus 7 Komponenten bestehenden Oxidsystems. Die im folgenden benutzten Beschreibungen wie isobar invarianter Punkt oder univariante Linie müssen hier also stets unter dem Vorbehalt verstanden werden, daß in Wirklichkeit zwei zusätzliche Freiheitsgrade vorhanden sind, wenn Diopsid neben Albit im System vorhanden ist.

Über das System Di-Ab-Or-Ks-Ne liegen die in Tabelle 1 zusammengestellten Untersuchungen vor. Die diopsidhaltigen Systeme sind bis jetzt nur bei Atmosphärendruck untersucht worden, mit Ausnahme des Systems Di-Ab-Ne-H_2O. Der Prozeß der fraktionierten Kristallisationsdifferentiation erfolgt aber in der Tiefe unter Druck, so

---

* Man bedenke, daß Ab sich aus Ne und Qz zusammensetzt und Or aus Ks und Qz.

Tabelle 1 Bisherige Untersuchungen im System Di - Qz - Ne - Ks

System	Autoren,	Jahrgang	P (Bar)	Natur	Bemerkungen		
Di-Ab-Or-Ks-Ne:							
Di-Ab-Lc	SOOD, PLATT, EDGAR	1970	1	pseudo-ternär	1 Dp.	$Di_4Ab_{62}Lc_{34}$	1040°C
Di-Ne-Or	SOOD, PLATT, EDGAR	1970	1	"	2 Dp.	$Di_{21}Ne_{51}Or_{28}$	1158°C
						$Di_{12}Ne_{45}Or_{43}$	1120°C
Di-Ne-Lc	GUPTA	1973	1	"	2 Dp.	$Di_{60}Ne_8Lc_{32}$	1275°C
						$Di_{28}Ne_{29}Lc_{43}$	1194°C
Di-Ab-Or	MORSE	1968	1	"	1 Dp.	ohne Angabe	1020°C
Di-Ab-Ne	SCHAIRER, YODER	1960	1	"	2 Dp.	$Di_{15}Ne_{65}Si_{20}$	1118°C
						$Di_{28}Ne_{60}Si_{12}$	1138°C
Di-Ab-Ne-H_2O	EDGAR	1964	1000	"	1 Dp.	$Di_5Ne_{29}Ab_{66}$	885°C
Di-Ne-Ks	nicht bearbeitet						
Di-Ks-Or	SCHAIRER, BOWEN	1938	1	ternär	1 R.-Punkt 1 E.-Punkt		1100°C 900°C
Ab-Or-Ks-Ne	BOWEN	1937	1	"	sh. Literaturverzeichnis		
Ab-Or-Ks-Ne-H_2O	FUDALI	1963	1000	quaternär	1 R.-Punkt		800°C
= = = = =	HAMILTON, MACKENZIE	1965	1000	"	1 M.	$Ne_{50}Ks_{19}Qz_{31}$	750°C
= = = = =	MORSE	1968	5000	"	1 E.	$Ne_{53}Ks_{19}Qz_{28}$	635°C
Ab-Or	SCHAIRER	1950	1	Binär	1 M.	$Ab_{65}Or_{35}$	1035°C
Ab-Or-H_2O	TUTTLE, BOWEN	1950	1000	ternär	1 M.	" "	815°C
= = =	" "	1950	2000	"	1 M.	" "	742°C

Fortsetzung / Tabelle 1

System	Autoren,	Jahrgang	P (Bar)	Natur	Bemerkungen		
$Ab-Or-H_2O$	YODER, STEWART SMITH	1957	5000	ternär	1 E.	$Ab_{71,5}Or_{28,5}$	695°C
= = =	MORSE	1970	5000	"	1 E.	" "	"
Ab-Ne	GREIG, BARTH	1938	1	binär	1 E.	$Ab_{76}Ne_{24}$	1068°C
$Ab-Ne-H_2O$	MACKENZIE	1954, 1955	1000	ternär	1 E.	$Ab_{72}Ne_{28}$	780°C
= = =	EDGAR	1964	1000	"	1 E.	$Ab_{73}Ne_{27}$	835°C
= = =	PETERS, LUTH, TUTTLE	1966	1000-10000	"	siehe Literaturverzeichnis		
Ab-Ne	BELL, ROSEBOOM	1966	10000-40000	binär	"	"	"
Ne-Ks	TUTTLE, SMITH	1958	1	"	komplexes System mit 4 primären kristallinen Phasen		
Ks-Or	nicht bearbeitet						
Di-Ab	SCHAIRER, YODER	1960	1	pseudo-binär	1 Dp.	$Ab_{91}Di_9$	
Di-Ne	SCHAIRER, YODER	1960	1	"	2 Dp.		
Di-Ks	nicht bearbeitet						
Di-Or	SCHAIRER, BOWEN	1938	1	"	1 Dp.		

daß die Ermittlung der kotektischen Beziehungen zwischen Schmelze + Diopsid + Alkalifeldspat + Nephelin-Mischkristall bei verschiedenen Drucken petrogenetisch wichtig ist.

Vor den Untersuchungen im diopsidhaltigen System wurden einige experimentelle Untersuchungen im diopsidfreien System durchgeführt, um den Anschluß an bisherige Arbeiten anderer Autoren methodisch sicherzustellen. Der Grund für die Durchführung dieser Untersuchungen liegt in den unterschiedlichen Angaben verschiedener Autoren für die Temperatur und die Zusammensetzung kotektischer Gleichgewichtszustände im diopsidfreien System.

II. Ausgangsmaterialien

Für die experimentelle Durchführung dieser Arbeit wurden keine Gläser und Gele, sondern kristalline Ausgangssubstanzen verwendet. WINKLER et al. (1972) konnten folgendes herausstellen: Das Auskristallisieren von hydrothermal hergestellten Gläsern und von flüssigen Schmelzen in einem Kalifeldspat enthaltenden System zeigt einen starken Unterkühlungseffekt, so daß weder der Beginn des Kristallisierens, d.h. die Liquidustemperatur, noch das Ende des vollständigen Kristallisierens, d.h. die Solidustemperatur, durch Temperaturerniedrigung einer Schmelze exakt ermittelt werden kann. Vielmehr muß man von Gemengen der an einer Phasenbeziehung beteiligten kristallinen Minerale ausgehen und durch schrittweise Temperaturerhöhung in aufeinander folgenden Versuchen die

erste Schmelzbildung bzw. das Verschwinden bestimmter Mineralarten beobachten, wobei sorgfältig darauf geachtet werden muß, daß sich niemals eine höhere Temperatur als die gewünschte Versuchstemperatur einstellt. Nur mit dieser Methode kann man sicher sein, die Solidusbedingung bzw. andere Gleichgewichtszustände zu bestimmen.

Die kristallinen Ausgangssubstanzen Di, Ab, Ne, $Ab_{70}Or_{30}$, $Ab_{80}Or_{20}$, $Ne_{69}Ks_{31}$ und $Ne_{79}Ks_{21}$ wurden bei 2 kb H_2O-Druck und einer Temperatur von etwa 700°C synthetisiert, wofür folgende Substanzen verwendet wurden:

1. Calciumhydroxid, p.a.
2. Natriumhydrogenkarbonat, p.a.;
3. Kaliumhydrogenkarbonat, p.a.;
4. Aluminiumhydroxid, reinst;
5. Kieselsäure, gefällt, getrocknet
alle MERCK, Darmstadt;
6. Magnesiumoxid, p.a.; Riedel de Häen, Hannover.

Es wurde eine homogenisierte Ausgangsmischung der Zusammensetzung der jeweiligen Phase aus berechneten Mengen der erwähnten Substanz hergestellt. In Rationen von 500 mg reagierten diese Mischungen in einer Woche zu den gewünschten Phasen. Mit Hilfe des Zählrohrgoniometers wurde das jeweilige Syntheseprodukt identifiziert und festgestellt, daß keine Reaktionsreste vorhanden waren.

III. Experimentelles

Alle Versuche zu dieser Arbeit wurden bei 1, 4 und 7 kb H_2O-Druck in einer Hydrothermalapparatur mit standard "cold seal" Bomben nach der im Mineralog.-Petrolog. Institut seit langem bewährten Methode durchgeführt. Die Druckgenauigkeit beträgt $\pm$ 2%. Die Genauigkeit der Temperaturangaben beträgt $\pm$ 5°C, wenn Proben von 10 mm Länge verwendet werden.

Die Identifizierung der einzelnen Mineralphasen wurde röntgenographisch mit dem Zählrohrgoniometer durchgeführt. Diese mußte bei der Auswertung der Versuche bei höheren Temperaturen, bei denen Alkalifeldspat und Nephelin-Mischkristall nur noch in geringer Konzentration neben Diopsid existierten, wegen der annähernden Koinzidenz nahezu sämtlicher Hauptinterferenzen der drei Mineralphasen sehr sorgfältig vorgenommen werden. Eine optische Untersuchung an Kornpräparaten war wegen der Feinkörnigkeit des Probeninhaltes nicht möglich. Der Schmelzanteil der Probe konnte unter dem Binokular entweder in Form von glasklaren kleinen Kügelchen beobachtet werden, oder die gesamte Probe lag als Schmelzkuchen vor. Eine quantitative Abschätzung des Diopsidgehaltes wurde mittels Vergleichsaufnahmen durchgeführt, indem Pulverpräparate angefertigt wurden, die aus Quarzglas und bestimmten Mengen Diopsid bestanden.

IV. Untersuchungen im System Qz-Ne-Ks-H_2O

Da es die Aufgabe dieser Arbeit ist, den Einfluß des Diopsids auf den SiO_2-untersättigten, Na-reicheren Teil des Residualsystems zu untersuchen, werden hier nur die Arbeiten vorgestellt, die sich direkt mit diesem Teil des Systems befassen; und zwar wird hier zunächst nur das diopsidfreie System Ab-Or-Ks-Ne-H_2O betrachtet.

Im folgenden wird zunächst kurz das System Ab-Ne-H_2O, welches eine wichtige Ausgangsposition für unsere Untersuchungen darstellt, beschrieben. Anschließend soll dann das Teilsystem Ab-Or-Ks-Ne-H_2O innerhalb des Vierstoffsystems Qz-Ne-Ks-H_2O erörtert werden.

1) Das System Ab-Ne-H_2O

Das System Ab-Ne stellt ein eutektisches System dar und wurde von GREIG & BARTH (1938) bei 1 Atmosphäre untersucht. Die Zusammensetzung des Eutektikums (E_2), 76 Gew.% Ab, wurde experimentell bei einer Temperatur von 1068 $\pm$ 5°C bestimmt.

MACKENZIE (1954, 1955) und EDGAR (1964) untersuchten dieses System bei 1 kb H_2O-Druck. Während MACKENZIE die Zusammensetzung des Eutektikums mit $Ab_{72}Ne_{28}$ und die eutektische Temperatur mit 780°C angibt, stellt EDGAR fast die gleiche Zusammensetzung, nämlich $Ab_{73}Ne_{27}$ fest, aber eine deutlich höhere Temperatur von 835°C. Aus den Untersuchungen von PETERS, LUTH & TUTTLE (1966) ist eine Ab-ärmere Zusammensetzung für das Eutektikum E_2 bei 1 kb, nämlich $Ab_{65}Ne_{35}$ zu entnehmen. Die eutektische Temperatur liegt nach diesen Autoren bei 850°C.

Wesentlich anders sieht das System Ab-Ne-H_2O bei Drucken größer als 4.75 kb aus. Denn nach PETERS et al. (1966) ist bei einem Druck von 4.75 $\pm$ 0.25 kb und einer Temperatur von 665 $\pm$ 5°C das Stabilitätsfeld von Analcim soweit gewachsen, daß die P-T-Kurve des Eutektikums zwischen Albit und Nephelin von der Gleichgewichtskurve Anl = Ab + Ne + V geschnitten wird (Abb.1). In diesem invarianten Punkt des Dreistoffsystems stehen drei kristalline Phasen, nämlich Analcim, Albit und Nephelin mit der Schmelze und der Gasphase im Gleichgewicht. Bei H_2O-Drucken größer als 4.75 kb sind Albit und Nephelin in Gegenwart einer Gasphase nicht mehr neben-

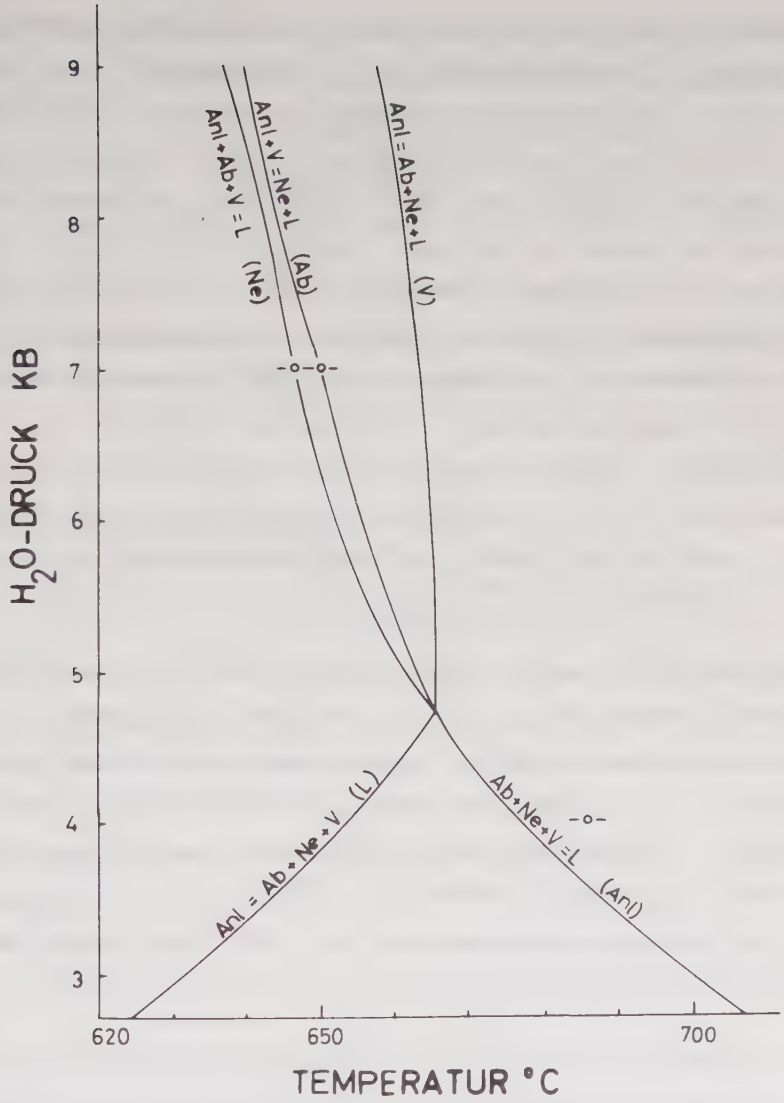

Abb.1: Darstellung des invarianten Punktes im System Ab-Ne-Wasser in dem Anl, Ne, Ab, L und V miteinander im Gleichgewicht stehen; nach PETERS, LUTH & TUTTLE (1966).
Die Symbole (Anl), (Ne), (Ab), (L), (V) repräsentieren die abwesende Phase entlang der jeweiligen Gleichgewichtskurve. Die eingezeichneten Punkte auf den Kurven (Anl), (Ne) und (Ab) sind die in dieser Arbeit ermittelten Werte bei 4 und 7 kb.

einander stabil. Von dem invarianten Punkt gehen dann drei Gleichgewichtskurven zu höheren Drucken aus, die Kurven

$$\text{Anl} + \text{Ab} + \text{V} = \text{L}; \quad (\text{Ne})$$

$$\text{Anl} + \text{V} = \text{Ne} + \text{L}; \quad (\text{Ab})$$

und $$\text{Anl} = \text{Ab} + \text{Ne} + \text{L}; \quad (\text{V}).$$

Bei den Untersuchungen von MACKENZIE (1954, 1955), EDGAR (1964) und PETERS et al. (1966) sind verschiedene Zusammensetzungen für das Eutektikum und verschiedene eutektische Temperaturen bei 1 kb H_2O-Druck ermittelt worden. Dieser Diskrepanz wird hier nicht nachgegangen. Aber eine Bestimmung der Gleichgewichtszustände in diesem System bei den uns stärker interessierenden höheren Drucken von 4 und 7 kb ist sinnvoll, um diese Ergebnisse dann mit den Daten von PETERS et al. zu vergleichen.

Für unsere experimentellen Untersuchungen bei 4 und 7 kb H_2O-Druck wurden 11 Mischungen (S_I bis S_{XI}) verwendet. Die Versuchsergebnisse sind in den Tabellen 1A und 2A zusammengestellt. Die Lage des Eutektikums E_2 fällt auf Grund der durchgeführten Versuche bei 4 kb H_2O-Druck mit dem darstellenden Punkt der Mischung S_{VI}, $Ab_{58}Ne_{42}$, zusammen. Die eutektische Temperatur liegt bei 685 $\pm$ 5°C. Diese beiden Ergebnisse stimmen mit den von PETERS et al. angegebenen Werten überein.

Aus den Versuchsergebnissen bei 7 kb geht hervor, daß der darstellende Punkt der Mischung S_{VIII}, $Ab_{52}Ne_{48}$, mit dem Eutektikum zwischen Ab und Anl identisch ist. Die eutektische Temperatur liegt hier bei 645 $\pm$ 10°C und ist in sehr guter Übereinstimmung mit dem Wert von 647°C, der aus Fig. 2 in der Arbeit von PETERS et al. zu entnehmen ist. Die Zusammensetzung des Eutektikums bei 7 kb kann

mit Werten von PETERS et al. nicht verglichen werden, weil jene Autoren keine Experimente bei 7 kb durchgeführt haben. Jedoch ergab sich auf Grund der Untersuchungen von PETERS et al., daß dieses Eutektikum sich mit zunehmendem Druck sehr nahe an den darstellenden Punkt von Analcim verschiebt, also der Zusammensetzung $Ab_{50}Ne_{50}$ sehr nahe kommt. Auch das hat unsere Bestimmung ergeben.
Hiermit ist nachgewiesen, daß die in dieser Arbeit verwendete Untersuchungsmethode identische Ergebnisse wie PETERS et al.(1966) liefert.

2) Das System Ab-Or-Ks-Ne-H_2O

Der SiO_2-untersättigte Teil des Bowenschen Residualsystems ist bei 1 kb H_2O-Druck von FUDALI (1963) im K-reicheren und von HAMILTON & MACKENZIE (1965) im Na-reicheren Teil untersucht worden. Der Na-reichere Teil, auf den sich auch die Untersuchungen im diopsidhaltigen System in dieser Arbeit beziehen, wird von einer kotektischen Linie durchzogen, die das Kristallisationsfeld des Alkalifeldspates vom Foidfeld trennt. Auf dieser Linie existiert ein Minimum, dessen Zusammensetzung von HAMILTON et al. bei 1 kb mit $Ne_{50}Ks_{19}Qz_{31}$ angegeben wird. Die Temperatur des Schmelzbeginns für die Minimumzusammensetzung liegt nach diesen Autoren bei 750°C.

Dieser Teil des Residualsystems wurde auch bei 5 kb H_2O-Druck von MORSE (1968) untersucht. Wegen der unvollständigen Mischkristallbildung der Alkalifeldspäte bei diesem Druck tritt nun eine weitere kotektische Linie auf, die das Kristallisationsfeld des Ab-reicheren Alkalifeldspates, Alk.Feldsp.(1), vom Feld des Or-reicheren Alkalifeldspates, Alk.Fsp.(2), trennt. Da jetzt zwei Alkalifeldspäte statt eines homogenen Alkalifeldspates vorliegen, kann das ternäre System univariant und damit eutektisch werden:

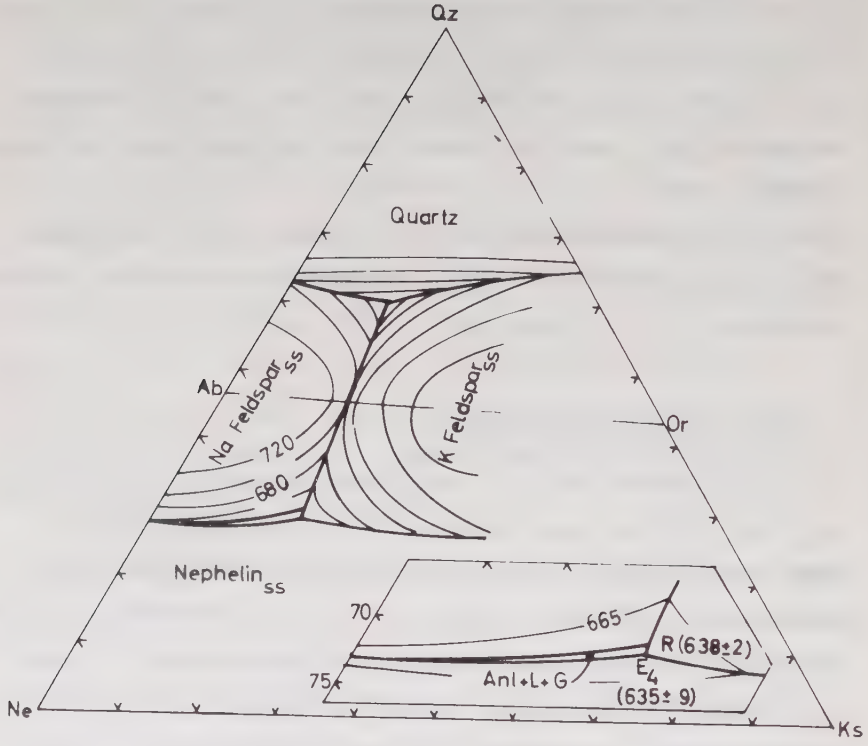

Abb.2: Das Bowensche Residualsystem bei 5 kb H_2O-Druck nach MORSE (1968).
Der SiO_2-übersättigte Teil stammt von LUTH, JAHNS & TUTTLE (1964).

In dem Eutektikum E_4 der Abb. 2 stehen drei kristalline Phasen mit der Schmelze und der Gasphase im Gleichgewicht. Es sind zwar nicht die kristallinen Phasen Ab-reicher Alkalifeldspat, Or-reicher Alkalifeldspat und Foid, sondern Analcim, Or-reicher Alkalifeldspat und Foid. Nach MORSE existiert nämlich ein schmales Analcimfeld zwischen den Kristallisationsfeldern des Ab-reichen Alkalifeldspates und des Foides. Der Ab-reiche Alkalifeldspat reagiert kurz oberhalb der eutektischen Temperatur von 635°C, zwischen 635°C und 640°C, mit der Schmelze unter Bildung von Analcim und Or-reichem Alkalifeldspat. Auf Grund dieser Tatsache steht die eutektische Schmelze mit Analcim, Or-reichem Alkalifeldspat, Foid und der Gasphase im Gleichgewicht. Der Reaktionspunkt R auf der kotektischen Linie Alk.Fsp. (1) + Alk.Fsp. (2) + L + V, in dem der Ab-reiche Alkalifeldspat mit der Schmelze reagiert, ist von MORSE in Abb.2 vergrößert dargestellt.

Für die experimentelle Durchführung ihrer Arbeit verwendeten HAMILTON & MACKENZIE (1965) und MORSE (1968) Gele und Gläser, und die Liquidustemperaturen wurden ausgehend von einer Schmelze durch Temperaturerniedrigung bestimmt. Aus dem auf Seite 7 aufgeführten Grunde wurde eine Kontrolle der von jenen Autoren ermittelten Liquidustemperaturen und eine gleichzeitige Prüfung der Lage der kotektischen Linie für notwendig erachtet. Zu diesem Zweck wurde bei dem Druck von 1 kb ein Punkt auf der von HAMILTON et al. angegebenen kotektischen Linie kontrolliert, der dem Minimum bei 1 kb sehr nahe liegt. Es ist P_2, der Schnittpunkt der Verbindungslinie $Ab_{70}Or_{30}$ - $Ne_{69}Ks_{31}$ mit der kotektischen Linie Alk.Fsp. + Ne_{ss} + L + V. Dieser Punkt (piercing point), der in dem von MORSE (1968) veröffentlichten Diagramm bei 5 kb H_2O-Druck auf der ko-

tektischen Linie Alk.Fsp.(2) + Ne_{ss} + L + V liegt (Abb.2), soll auch bei 4 und 7 kb H_2O-Druck bestimmt und mit der von MORSE bestimmten kotektischen Linie bei 5 kb verglichen werden.

Für die Bestimmung der Lage des Durchstoßpunktes P_2 (siehe Abb.3) bei 1, 4 und 7 kb wurden vier Mischungen aus dem synthetisierten Alkalifeldspat der Zusammensetzung $Ab_{70}Or_{30}$ und Nephelin-Mischkristall der Zusammenstzung $Ne_{69}Ks_{31}$ hergestellt. In Abb.3, die nach den experimentellen Ergebnissen von FUDALI und HAMILTON & MACKENZIE gezeichnet wurde, ist die Lage der Mischungen I bis IV eingetragen. Die Versuchsergebnisse zur Bestimmung der Lage des Punktes P_2 bei 1, 4 und 7 kb sind in den Tabellen 3A, 4A und 5A im Anhang dieser Arbeit zusammengestellt worden.

Durch die Experimente bei 1 kb (siehe Tab. 3A) bestätigte sich in dem von uns untersuchten Bereich die von HAMILTON & MACKENZIE bestimmte Lage der kotektischen Linie. Jedoch die Liquidustemperatur, bei der die letzte kristalline Phase gerade vollständig in die Schmelze geht, liegt für die Mischung I zwischen 795°C und 800°C, für die Mischung II zwischen 800°C und 805°C und für die Mischung III bei 810°C oder nur wenig darüber. Diese Temperaturen, die hier unter alleiniger Verwendung von kristallinen Substanzen bestimmt wurden, liegen um 25 bis 30°C über den von den genannten Autoren angegebenen Werten. Dieser Temperaturunterschied kann wahrscheinlich am besten dadurch erklärt werden, daß die Liquidustemperaturen hier ausgehend von kristallinen Ausgangssubstanzen durch schrittweise Temperaturerhöhung bestimmt worden sind, während sie bei jenen Autoren durch Temperaturerniedrigung ausgehend von Schmelzen bestimmt wurden und daher infolge notwendiger Unterkühlung einen um 25 bis 30°C niedrigeren Wert ergaben.

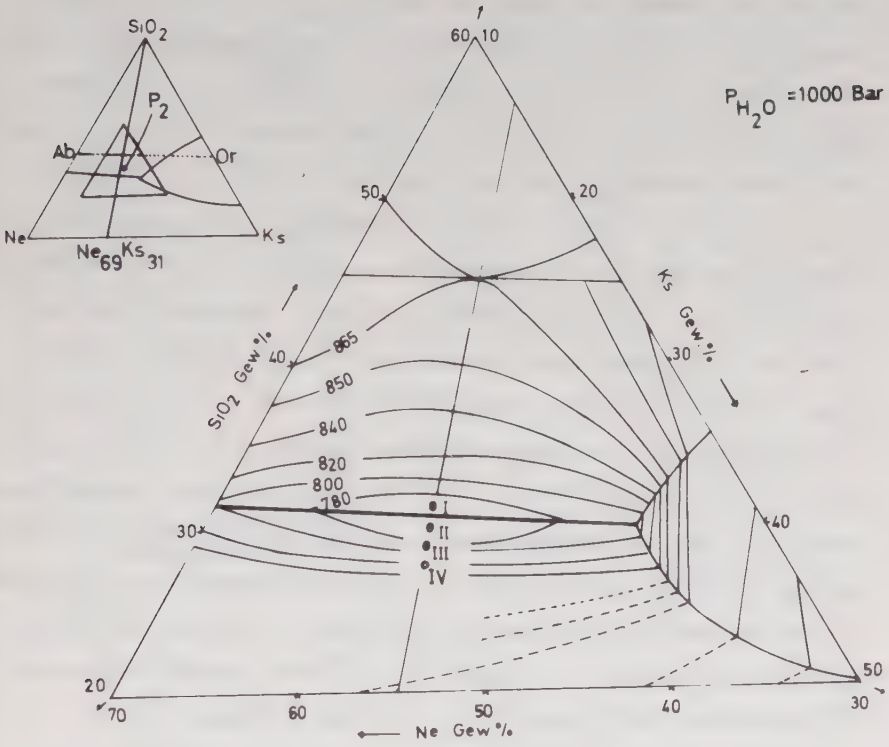

Abb. 3: Die darstellenden Punkte der Mischungen I bis IV in Bezug zur kotektischen Linie Alk.Fsp + Ne_{ss} + L + V im System Qz-Ne-Ks-H_2O nach HAMILTON & MACKENZIE (1965) bei 1 kb.
Bei dieser Abbildung ist das im Übersichtsdiagramm eingezeichnete Teildreieck vergrößert dargestellt. Es sei darauf hingewiesen, daß die von den genannten Autoren gemachten Temperaturangaben in dieser Abb. um 25 bis 30°C zu tief sind, was in dieser Arbeit auf Seite 16 festgestellt wurde.

Für die Bestimmung der Lage des Punktes P_2 bei 4 und 7 kb H_2O-Druck wurden drei Mischungen benutzt, deren darstellende Punkte in der Abb. 3 mit der Bezeichnung II, III und IV wiedergegeben sind. Durch diese Untersuchungen konnte festgestellt werden, daß der Durchstoßpunkt P_2, auf der kotektischen Linie Alk.Fsp.(2) + Ne_{ss} + L + V, gegenüber 1 kb sich in meßbarer Weise geringfügig in den SiO_2-ärmeren Teil des Systems verschoben hat: Der Durchstoßpunkt hat bei 4 kb die Zusammensetzung der Mischung II, und bei 7 kb ist er mit dem darstellenden Punkt der Mischung III identisch. Die eutektischen Zusammensetzungen bei 4 und 7 kb, die der Zusammensetzung des genannten Durchstoßpunktes sehr nahe liegen, wurden nicht genau bestimmt, wohl aber die der eutektischen Temperaturen. Die eutektische Temperatur beträgt bei 4 kb 655 ± 5°C und bei 7 kb 620 ± 5°C. Es sei erwähnt, daß MORSE die eutektische Temperatur von E_4 bei 5 kb mit 635°C angibt. Dieser Wert liegt zwischen den Werten für 4 und 7 kb der hier bestimmten eutektischen Temperaturen. Somit sind alle Angaben konsistent.

Die Temperatur des Durchstoßpunktes P_2 liegt - wie erwartet werden muß - etwas höher, nämlich bei 678°C und 4 kb bzw. 645°C und 7 kb. In Tabelle 2 sind die Alkalifeldspat/Foid-Verhältnisse des Durchstoßpunktes P_2 bei 1, 4 und 7 kb H_2O-Druck mit den jeweiligen Temperaturen zusammengestellt worden.

Tabelle 2 Die Komponentenverhältnisse in der kotektischen Schmelze, welche bei der angegebenen Temperatur mit Alk.Fsp., Ne_{ss} und Gasphase koexistiert, für den Durchstoßpunkt P_2 bei 1, 4 und 7 kb.

P(kb)	Temp. (°C)	Alk.Fesp.	Ne_{ss}
1	800	69.00	31.00
4	678	66.25	33.75
7	645	62.50	37.50

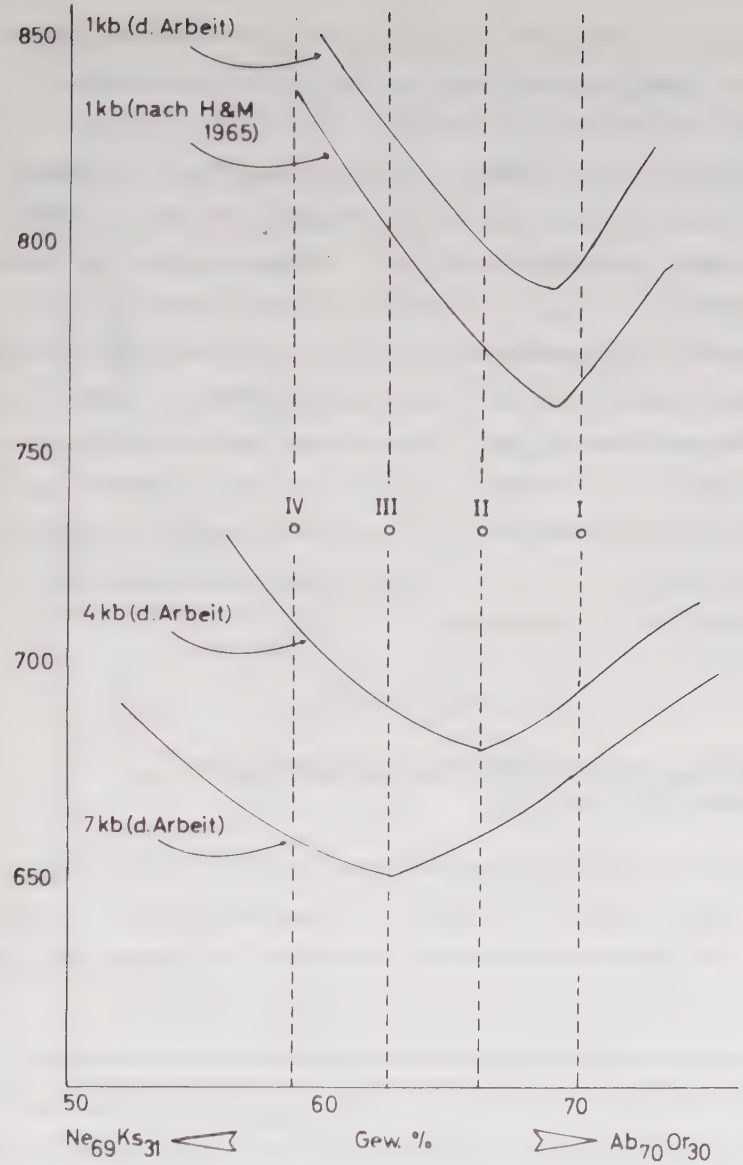

Abb. 4: Spur der Liquidusflächen im SiO_2-untersättigten Teil des Bowenschen Residualsystems mit dem Schnitt $Ab_{70}Or_{30}$ - $Ne_{69}Ks_{31}$; die darstellenden Punkte der Mischungen sind auch angegeben. Dargestellt sind ebenfalls die Schnittlinien nach HAMILTON et al.(1965) bei 1 kb.

Abb. 4 ist eine graphische Darstellung des Schnittes $Ab_{70}Or_{30}$ - $Ne_{69}Ks_{31}$ mit den Liquidusflächen im SiO_2-untersättigten Teil des Bowenschen Residualsystems bei 1, 4 und 7 kb. Die darstellenden Punkte der Mischungen I bis IV sind ebenfalls angegeben. In dieser Darstellung ist auch die entsprechende Schnittlinie nach HAMILTON & MACKENZIE (1965) bei 1 kb dargestellt. Der Schnitt von MACKENZIE et al. bei 1 kb liegt um 25-30°C unter dem von uns beim gleichen Druck ermittelten Schnitt. Analog sind die von MORSE angegebenen Temperaturen bei 5 kb ebenfalls etwas zu niedrig (ca. 10°C); denn sein Schnitt bei 5 kb fällt mit unserem Schnitt bei 7 kb zusammen. Diese Feststellung bestätigt die von WINKLER et al. herausgestellte Notwendigkeit, nur unter Verwendung kristalliner Ausgangssubstanzen durch schrittweise Temperaturerhöhung die Liquidustemperaturen zu bestimmen.

3) Bestimmung des H_2O-Druckes, bei dem erstmalig das Eutektikum auftritt.

Das System Ab-Or-Ks-Ne-H_2O hat bei 1 kb ein Minimum und wird ab einem bestimmten Druck eutektisch. Im folgenden wird der H_2O-Druck bestimmt, bei dem das Temperaturminimum durch das Eutektikum ersetzt wird.

Im SiO_2-untersättigten Bereich des Vierstoffsystems Qz-Ne-Ks-H_2O tritt dann ein Eutektikum auf, wenn statt eines homogenen Alkalifeldspates zwei Feldspäte mit Nephelin-Mischkristall und der Schmelze in Gegenwart einer Gasphase im Gleichgewicht stehen. Anders ausgedrückt: Ein Eutektikum tritt erst dann an die Stelle eines Minimums, wenn bei einem bestimmten Druck die Solvuskurve auf die Soliduskurve tritt. Die Druck-Temperatur-Bedingung, bei der das zutrifft, kann aus dem P-T-Diagramm der Abb.5 abgelesen werden.

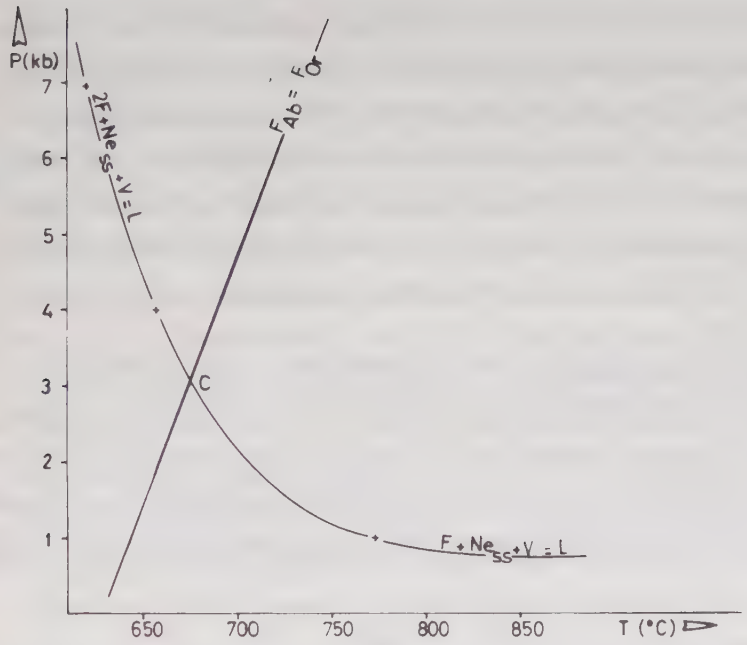

Abb. 5: Graphische Darstellung der "kritischen" Kurve der Alkalifeldspäte $F_{Ab} = F_{Or}$ nach SECK (1971) und der Soliduskurve = Beginn des Schmelzens von Zusammensetzungen des Punktes P_2 nach eigenen Daten.
Der Schnittpunkt dieser beiden Kurven bei 3,1 $\pm$ 0,1 kb und 675 $\pm$ 5°C bezeichnet das erstmalige Auftreten des Eutektikums E_4, in dem zwei verschiedene Alkalifeldspäte mit Ne_{ss} und der Schmelze neben einer Gasphase im Gleichgewicht stehen.

In Abb. 5 sind zwei Kurven eingezeichnet worden:

1.) Die "kritische" Kurve der Alkalifeldspäte $F_{Ab} = F_{Or}$ nach SECK (1971).

Bei den Daten dieser Kurve steht der "kritische" Alkalifeldspat, nämlich der mit der Zusammensetzung von der Solvusspitze (Definition aus der Arbeit von SECK, 1971), mit einer Gasphase im Gleichgewicht. Die Lage dieser Kurve wurde ebenfalls von THOMPSON & WALDBAUM (1969) nach experimentellen Daten von LUTH & TUTTLE (1966) bestimmt; sie verläuft im P-T-Diagramm um $+7^{o}C$ parallel zu der hier dargestellten, von SECK bestimmten Kurve $F_{Ab} = F_{Or}$.

Die Kurve $F_{Ab} = F_{Or}$ teilt das P-T-Diagramm in zwei Bereiche ein: Der Bereich links von dieser Kurve, nämlich zu höheren Drucken und niedrigeren Temperaturen ist das Feld der Koexistenz von zwei Alkalifeldspäten. Der Bereich zu niedrigeren Drucken und höheren Temperaturen kennzeichnet das Feld eines homogenen Alkalifeldspates.

2.) Die Soliduskurve des Durchstoßpunktes P_2, die in dieser Arbeit experimentell bei 1, 4 und 7 kb H_2O-Druck ermittelt wurde, ist ebenfalls in Abb. 5 eingezeichnet. Jeder Punkt dieser Kurve markiert bei einem bestimmten Druck die Temperatur, bei der erstmalig eine Schmelzbildung erfolgt. Die zuerst gebildete Schmelze hat aufgrund der auserwählten Lage des Punktes P_2 die Zusammensetzung, die der Minimum-Zusammensetzung sehr nahe kommt. Wenn im System ein Eutektikum auftritt, dann hat natürlich die Erstschmelze die Zusammensetzung des bei dem gegebenen Druck gültigen Eutektikums; auch dieses kommt der Zusammensetzung des Punktes P_2 für den entsprechenden Druck nahe.

Die Soliduskurve schneidet die kritische Kurve der Alkalifeldspäte bei einem H_2O-Druck von 3,1 $\pm$ 0,1 kb und einer Temperatur von 675 $\pm$ 5°C im Punkt C. Entlang der Soliduskurve unterhalb 3,1 kb steht folglich ein homogener Alkalifeldspat mit Nephelin-Mischkristall und einer Schmelze in Gegenwart einer Gasphase im Gleichgewicht. In dem Teilbereich der Soliduskurve oberhalb 3,1 kb liegt ein univariantes Gleichgewicht vor, weil hier zwei Alkalifeldspäte, ein Ab-reicher und ein Or-reicher Alkalifeldspat, mit Nephelin-Mischkristall, Schmelze und der Gasphase im Gleichgewicht stehen. Das univariante Gleichgewicht Alk.Fsp.(1) + Alk.Fsp.(2) + Ne_{ss} + L + V kennzeichnet ein Eutektikum, welches also erst oberhalb des Druckes von 3,1 kb auftritt. Bei höheren Drucken etwas unterhalb von 5 kb tritt wieder eine andere Phasenbeziehung auf; denn Ab-reicher Alkalifeldspat, Nephelin-Mischkristall, Schmelze und die Gasphase können nicht mehr koexistieren. Ab-reicher Alkalifeldspat reagiert mit der Schmelze unter Bildung von Analcim, Or-reichem Alkalifeldspat und der Gasphase. Daher wird bei einem Druck von ca. 5 kb das Eutektikum Alk.Fsp.(1) + Alk.Fsp.(2) + Ne_{ss} + L + V ersetzt durch das Eutektikum Alk.Fsp.(2) + Anl + Ne_{ss} + L + V; und ein Reaktionspunkt R tritt zusätzlich im System auf (sh. Abb. 2).

V. Untersuchungen im System Di-Qz-Ne-Ks-H_2O

Im diopsidfreien Bowenschen Residualsystem Qz-Ne-Ks-H_2O können aus alkalibetonten, quarzuntersättigten Schmelzen wie foidarmen Alkalifeldspatsyeniten durch Kristallisationsdifferentiation solche Differentiate entstehen, die je nach ihrem Chemismus und dem Druck einen maximalen Foidgehalt zwischen 30 und 40 Gew.% aufweisen. Das geht aus den Untersuchungen von HAMILTON & MACKENZIE (1965) bei 1 kb, MORSE (1968) bei 5 kb und aus den Untersuchungen im vorangehenden Teil dieser Arbeit bei 4 und 7 kb hervor.

Die Genese derjenigen Alkaligesteine, die mehr als 40 Gew.% Foid enthalten (wie die foidreicheren Foidsyenite aus dem Diagramm von STRECKEISEN, 1967) kann jedoch nicht durch jenen Prozeß mittels des Bowenschen Residualsystems erklärt werden. Deshalb müßte man, um die Genese foidreicherer Foidsyenite zu diskutieren, die in diesen Gesteinen vorhandenen mafischen Gemengteile und den in den Feldspäten enthaltenen Anorthit-Anteil berücksichtigen.

Die bisher erwähnten Magmen bzw. deren Gesteine, nämlich foidreiche Alkalifeldspat-Syenite und Foidsyenite und deren vulkanische Äquivalente, enthalten ca. 10 Gew.% mafische Bestandteile, wobei in Foidsyeniten hauptsächlich Pyroxen enthalten ist. Daher ist es sinnvoll, das Kristallisationsverhalten solcher Schmelzen im Licht pyroxenhaltiger Silikatsysteme zu untersuchen. In dieser Arbeit wird der Einfluß des Diopsids auf den kotektischen Bereich der Systeme Di-Ab-Ne-H_2O und Di-$Ab_{70}Or_{30}$-$Ne_{69}Ks_{31}$-H_2O untersucht und anschließend der Verlauf der kotektischen Flächen im SiO_2-untersättigten Teil des um die Diopsidkomponente erweiterten Bowenschen Residualsystems diskutiert.

1. Untersuchungen im System Di-Ab-Ne-H_2O

Das System Di-Ab-Ne-H_2O ist ein Teil des Systems Di-Qz-Ne-H_2O und wurde von SCHAIRER & YODER (1960) bei 1 Atmosphäre und von EDGAR (1964) bei 1 kb H_2O-Druck untersucht. Diese Autoren konnten feststellen, daß in diesem System stets ein Ab-reicher Plagioklas statt reinen Albits auskristallisiert, wobei die beiden anderen kristallinen Phasen Diopsid und Nephelin auch Mischkristalle bilden. Diese Tatsache wird von BOWEN (1945) als "plagioclase effect" bezeichnet und folgendermaßen beschrieben:

> That the pure albite does not form from a liquid containing any lime compound may, indeed, be accepted as a general fact.

Das bedeutet, daß aus einer Schmelze, deren darstellender Punkt im System Di-Ab oder Di-Ab-Ne liegt, außer den kristallinen Phasen Diopsid oder Diopsid und Nephelin kein reiner Albit, sondern ein Ab-reicher Plagioklas auskristallisiert. Demnach sind die Systeme Di-Ab und Di-Ab-Ne nicht aus den Komponenten $CaMgSi_2O_6$, $NaAlSiO_4$ und SiO_2 zusammengesetzt, sondern aus dem Komponenten CaO, MgO, Na_2O, Al_2O_3 und SiO_2. Unter Hinzunahme von H_2O haben wir es also mit einem aus 6 Komponenten bestehenden System zu tun, wenn wir Gleichgewichte zwischen Kristallen, Schmelze und Gasphase im Teilsystem Di-Ab-H_2O oder Di-Ab-Ne-H_2O betrachten. Die Wahl eines 4-Komponentensystems (Dreieck + H_2O) verursacht in der Darstellung eine Reduzierung der Phasenbeziehungen um zwei Freiheitsgrade, wie es auch in der Einleitung dieser Arbeit erwähnt wurde. Auf Grund dieser Tatsache ist z.B. der Punkt E_6 in Abb.6, der von EDGAR (1964) als ein Reaktionspunkt bezeichnet wurde, weder ein Reaktionspunkt noch ein Eutektikum. In diesem Punkt stehen drei kristalline Phasen mit der Schmelze und der Gasphase im Gleichge-

wicht, so daß die Anzahl der Freiheitsgrade gleich 3 ist. Wenn der Punkt E_6 ein Reaktionspunkt oder ein Eutektikum wäre, dann müßten hier fünf kristalline Phasen vorhanden sein, damit ein univariantes Gleichgewicht vorliegt, welches für einen Reaktionspunkt und ein Eutektikum bezeichnend ist. In dieser Arbeit werden wir den Punkt E_6 als Durchstoßpunkt und die Feldergrenzlinien E_1E_6 und E_2E_6 als kotektische Linien bezeichnen, jedoch stets mit dem Vorbehalt, daß im dargestellten Punkt E_6 in Wirklichkeit ein trivariantes und auf den Linien E_1E_6 und E_2E_6 viervariante Gleichgewichte vorliegen.

Für die Bestimmung der Lage des Durchstoßpunktes E_6 bei 4 und 7 kb H_2O-Druck wurden 14 Mischungen (MS_1 bis MS_{XIV}) aus synthetisiertem Albit, Nephelin und Diopsid verwendet. Die Mischungen MS_I bis MS_X enthalten alle 10 Gew.% Diopsid und die Mischungen MS_{XI} bis MS_{XIV} nur 5 Gew.%. In Abb. 6 sind die darstellenden Punkte dieser Mischungen dargestellt. Für die Versuche bei 4 kb sind die Mischungen MS_1 bis MS_{VII} und bei 7 kb die Mischungen MS_{VII} bis MS_{XIV} verwendet worden. Die Versuchsergebnisse sind in den Tabellen 6A und 7A im Anhang dieser Arbeit zusammengestellt worden.

In Abb. 6 wurden die hier experimentell bestimmten Phasengrenzen im Bereich des Durchstoßpunktes E_6 bei 4 und 7 kb und die ebenfalls experimentell bestimmte Lage des binären Eutektikums E_2 im System Ab-Ne-H_2O bei gleichen Drucken dargestellt. In dieser Abb. sind auch die Lage der verwendeten Mischungen MS_I bis MS_{XIV} wiedergegeben. Damit man eine bessere Vorstellung von dem gesamten Verlauf der Phasengrenzen im Ab-reicheren Teil dieses Systems bekommt, sind die von EDGAR (1964) bestimmten kotektischen Linien bei 1 kb auch eingezeichnet worden.

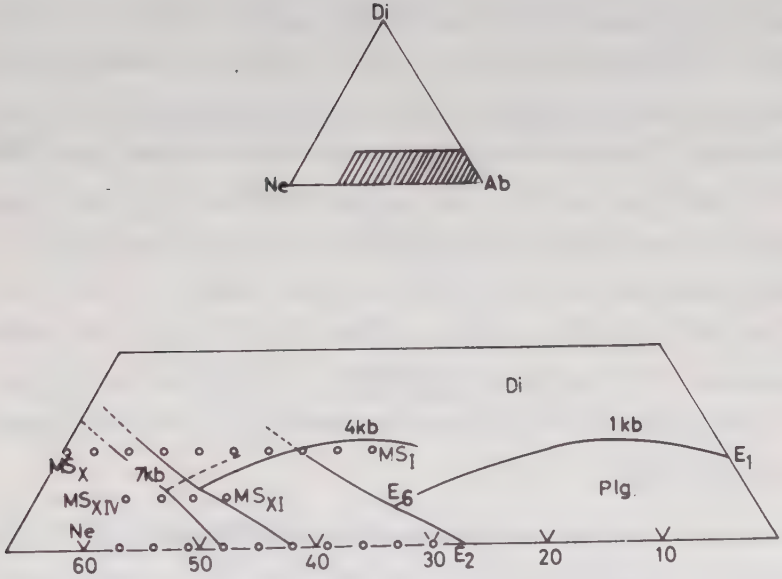

Abb. 6 : Zustandsdiagramm des Systems Di-Ab-Ne-H_2O nach EDGAR (1964) bei 1 kb. Die eingezeichneten Phasengrenzen im Bereich des Durchstoßpunktes E_6 bei 4 und 7 kb wurden hier experimentell bestimmt. Die darstellenden Punkte der verwendeten Mischungen sind ebenfalls eingezeichnet worden.

Der darstellende Punkt der zuerst gebildeten Schmelze kann im System Di-Ab-Ne-H_2O wegen seiner pseudoternären Natur nicht dargestellt werden. Hier können also nur die darstellenden Punkte jener Schmelzzusammensetzungen wiedergegeben werden, die sich bereits auf kotektischen Linien oder Flächen in diesem System befinden. Das Ab/Ne-Verhältnis der kotektischen Schmelze im Durchstoßpunkt E_6 entspricht auf Grund der durchgeführten Experimente bei 4 kb 50/50, also dem Verhältnis wie in der Mischung MS_{VI}. Die Liquidustemperatur der kotektischen Schmelze von E_6 liegt bei 735 $\pm$ 5°C. Diese Temperatur hat sich mit der Druckzunahme von 4 auf 7 kb weiter bis 705 $\pm$ 5°C erniedrigt, wobei sich die Lage des Durchstoßpunktes auch weiter zur Di-Ne-Seite verschoben hat: E_6 hat bei 7 kb H_2O-Druck das gleiche Ab/Ne-Verhältnis wie die Mischung MS_{VII}, also 47/53.

Um die Lage des Durchstoßpunktes auch hinsichtlich seines Diopsidgehaltes festzulegen, wurde die Menge an noch vorhandenem kristallinen Diopsid in der entsprechenden Probe bestimmt und von der gesamten Zusammensetzung der Ausgangsmischung abgezogen. Die quantitative röntgenographische Bestimmung des Diopsids erfolgte durch Vergleichsaufnahmen von Pulverpräparaten. Einem amorphen Quarzglas sind 4, 6 und 8 Gew.% Diopsid zugemischt worden. Die so angefertigten Präparate wurden mit den zu bestimmenden Proben hintereinander geröntgt. Bei 4 kb wurde in der Probe 53 (Tabelle 6A) etwa 4 Gew.% Diopsid bestimmt, so daß der Diopsidgehalt der kotektischen Schmelze der Mischung MS_{VI} und damit der Diopsidgehalt vom Punkt E_6 bei 6 $\pm$ 2 Gew.% liegt. Eine wesentliche Änderung des Diopsidgehaltes dieses Durchstoßpunktes konnte mit Druckzunahme auf 7 kb nicht festgestellt werden. In der Probe 41 (Tabelle 7A) bei 7 kb H_2O-Druck hat die Schmelze beim Verlassen des

Punktes E_6 ungefähr 6 ± 2 Gew.% Diopsid in sich gelöst. Der Diopsidgehalt vom Punkt E_6 beträgt also bei 7 kb auch 6 ± 2 Gew.%.

In Tabelle 3 ist die Zusammensetzung des Durchstoßpunktes E_6, bezogen auf Ab + Ne + Di = 100 bei 1, 4 und 7 kb wiedergegeben.

Tabelle 3 : Zusammensetzung des Durchstoßpunktes E_6, bezogen auf Ab + Ne + Di = 100 bei 1, 4 und 7 kb.

	Ab	Ne	Di
1	65	31	4
4	47	47	6
7	44	50	6

2. Untersuchungen im System $Di-Ab_{70}Or_{30}-Ne_{69}Ks_{31}-H_2O$

Dieses System ist ein Teil des Systems $Di-Qz-Ne_{69}Ks_{31}$ und stellt einen Schnitt durch das Tetraeder Di-Qz-Ne-Ks dar. Die kotektische Linie Alk-Fsp. + Ne_{ss} + Di + L + V im SiO_2-untersättigten Teil des Tetraeders wird von dieser Schnittebene im Punkt P_6 geschnitten. Dieser Durchstoßpunkt liegt bei Drucken von 4 und 7 kb, wo eine Entmischung der Alkalifeldspäte erfolgt ist, auf der kotektischen Linie Alk.Fsp.(2) + Ne_{ss} + Di + L + V. Für die Bestimmung dieses Durchstoßpunktes bei 1, 4 und 7 kb sind 5 Mischungen (M_{II} bis M_{VI}) aus dem synthetisierten Alkalifeldspat der Zusammensetzung $Ab_{70}Or_{30}$ und Nephelin-Mischkristall der Zusammensetzung $Ne_{69}Ks_{31}$ und Diopsid verwendet worden. Diese Mischungen enthalten alle 16,7 Gew.% Diopsid und liegen auf einer Linie parallel zum Basisdreieck Qr-Ne-Ks. Für die Versuchsreihen bei 1 kb sind die

Mischungen M_{II} und M_{III}, für die Versuche bei 4 kb die Mischungen M_{III} bis M_V und für die Versuche bei 7 kb die Mischungen M_{IV}, M_V und M_{VI} verwendet worden. Die Tabellen 8A, 9A und 10A im Anhang dieser Arbeit zeigen die Versuchsergebnisse bei 1, 4 und 7 kb. Graphisch wurden sie in Abb. 7 zusammengefaßt.

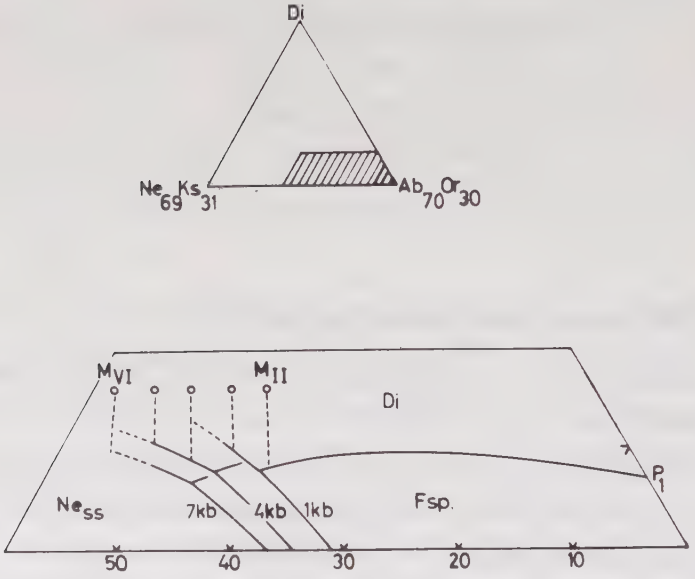

Abb. 7 : Schematische Darstellung der Schnittlinien der kotektischen Flächen im System Di-Qz-Ne-Ks mit der Schnittebene $Di\text{-}Ab_{70}Or_{30}\text{-}Ne_{69}Ks_{31}$ bei 1, 4 und 7 kb H_2O-Druck.

Das System Di-$Ab_{70}Or_{30}$-$Ne_{69}Ks_{31}$ wird, wie in Abb. 7 dargestellt, durch drei kotektische Linien in drei Bereiche geteilt, in den Diopsid-, den Alkalifeldspat- und den Foidbereich. Die gestrichelt dargestellte, auf P_6 zulaufende Linie stellt die kotektische Linie dar, auf der Diopsid, Nephelin-Mischkristall, Schmelze und Gasphase miteinander im Gleichgewicht stehen. Die Linie P_2P_6 trennt den Alkalifeldspatbereich von dem Foidfeld. Entlang dieser Linie herrscht in Gegenwart einer Gasphase ein Gleichgewicht zwischen Nephelin-Mischkristall, Alkalifeldspat und der Schmelze. Die dritte Linie, P_1P_6, die das Diopsidfeld vom Alkalifeldspatfeld trennt, bezeichnet ein Gleichgewicht zwischen Diopsid, Alkalifeldspat, Schmelze und der Gasphase.

Der Durchstoßpunkt P_6 liegt auf Grund der durchgeführten Experimente bei 1 kb zwischen den darstellenden Punkten der Mischungen M_{II} und M_{III}, bei 4 kb zwischen M_{III} und M_{IV} und bei 7 kb zwischen M_{IV} und M_v. Der Diopsidgehalt des Punktes P_6 wurde, wie es bei der Bestimmung des Diopsidgehaltes von E_6 beschrieben wurde, mittels Vergleichsaufnahmen von Pulverpräparaten bestimmt. Bei 1, 4 und 7 kb wurden in den aus den Mischungen M_{II} bis M_{VI} gebildeten kotektischen Schmelzen zwischen 7 und 10 Gew.% Diopsid bestimmt. Wenn man die angegebene Fehlergrenze von $\pm$ 2 Gew.% berücksichtigt, dann kann man den Diopsidgehalt dieser kotektischen Schmelzen als einen ziemlich druckunabhängigen Faktor betrachten. Der Diopsidgehalt des Durchstoßpunktes P_6 liegt damit in dem hier untersuchten Bereich bei den Drucken von 1, 4 und 7 kb bei 7 $\pm$ 2 Gew.%. In Tabelle 4 sind die Alkalifeldspat/Foid-Verhältnisse des Punktes P_6 bei 1, 4 und 7 kb zusammengestellt worden (bezogen auf 100). Vergleicht man diese Werte mit den von dem Durchstoß-

punkt P_2 in Tabelle 2 (S. 18) zusammengestellten Werten, so kann man feststellen, daß P_6 in der Projektion auf das Basisdreieck Qz-Ne-Ks bei 1, 4 und 7 kb um 5-6 Gw.% foidreicher ist als der Durchstoßpunkt P_2 bei dem entsprechenden Druck.

Somit konnte experimentell gezeigt werden, daß sowohl Druckerhöhung als auch die Gegenwart von Diopsid im System die Bildung foidreicherer niedrigtemperierter Schmelzen bewirkt. Während ohne Diopsid bei 1 kb der Punkt P_2 das Verhältnis Alk.Fsp./Ne_{ss} = 69/31 aufweist, beträgt bei Gegenwart von Diopsid und bei 7 kb H_2O-Druck jenes Verhältnis (des Punktes P_6) 57/43.

Tabelle 4 Die Komponentenverhältnisse in der kotektischen Schmelze, welche bei der angegebenen Temperatur mit Alk.Fsp., Ne_{ss}, Di und der Gasphase koexistiert, für den Durchstoßpunkt P_6 bei 1, 4 und 7 kb H_2O-Druck.

P (kb)	Temp. (^oC)	Alk.Fsp. / Ne_{ss}
1	810	64 / 36
4	690	60 / 40
7	655	57 / 43

VI. Phasenbeziehungen im SiO_2-untersättigten Teil des System Di-Qz-Ne-Ks-H_2O bei 1, 4 und 7 kb.

Nach den experimentellen Untersuchungen im System Di-Ab-Ne-H_2O bei 4 und 7 kb und im System Di-$Ab_{70}Or_{30}$-$Ne_{69}Ks_{31}$-H_2O bei 1, 4 und 7 kb ist es nun möglich, den Verlauf der kotektischen Flächen im SiO_2-untersättigten Teil des diopsidhaltigen Bowenschen Residualsystems zu konstruieren; dies haben in analoger Weise auch SOOD et al. (1970) für den Druck von 1 Bar gemacht.

Die Abb. 8 stellt ein räumliches Modell des Systems Di-Qz-Ne-Ks-H_2O bei 1 kb dar; H_2O ist stets im Überschuß und wurde deshalb in der Darstellung nicht berücksichtigt. In Abb. 8 erkennt man vier kotektische Flächen, die den Tetraederraum in vier Räume, den Diopsidraum, den Alkalifeldspatraum, den Quarzraum und den Foidraum, trennen. Den Quarzraum haben wir hier nicht zu betrachten. Eine Schmelze, deren darstellender Punkt oberhalb der kotektischen Fläche $E_1P_1P_6E_6$ im Diopsidraum liegt, beginnt beim Erreichen der Liquidustemperatur mit Diopsid zu kristallisieren. Mit weiterer Abkühlung kristallisiert mehr Diopsid aus, wobei der darstellende Punkt der Schmelzzusammensetzung sich in Richtung auf die kotektische Fläche $E_1P_1P_6E_6$ bewegt. Sobald die kotektische Fläche erreicht ist, fängt auch Alkalifeldspat neben Diopsid an zu kristallisieren. Die gemeinsame Kristallisation von Diopsid und Alkalifeldspat verläuft über einen gewissen Temperaturbereich, wobei sich die Lage des darstellenden Punktes der Schmelzzusammensetzung auf der kotektischen Fläche ändert, indem er sich wie bei den hier experimentell behandelten Zusammensetzungen (hinter dem Schnitt Di-Qz-$Ne_{69}Ks_{31}$) in Richtung auf die kotektische Linie E_6P_6 verschiebt. Wenn die kotektische Linie erreicht ist,

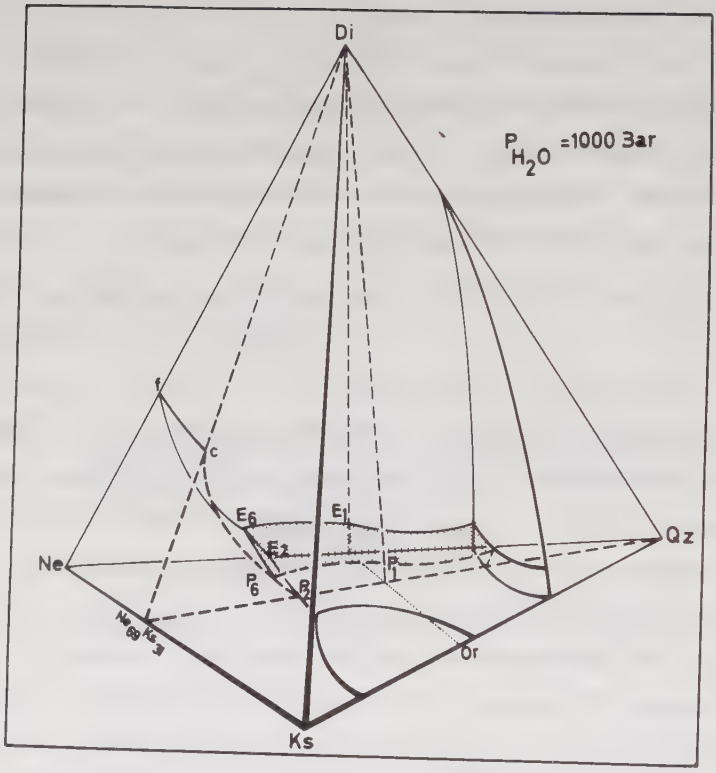

Abb. 8 : Räumliches Modell des Systems Di-Qz-Ne-Ks bei 1 kb H_2O-Druck; H_2O ist stets im Überschuß vorhanden.

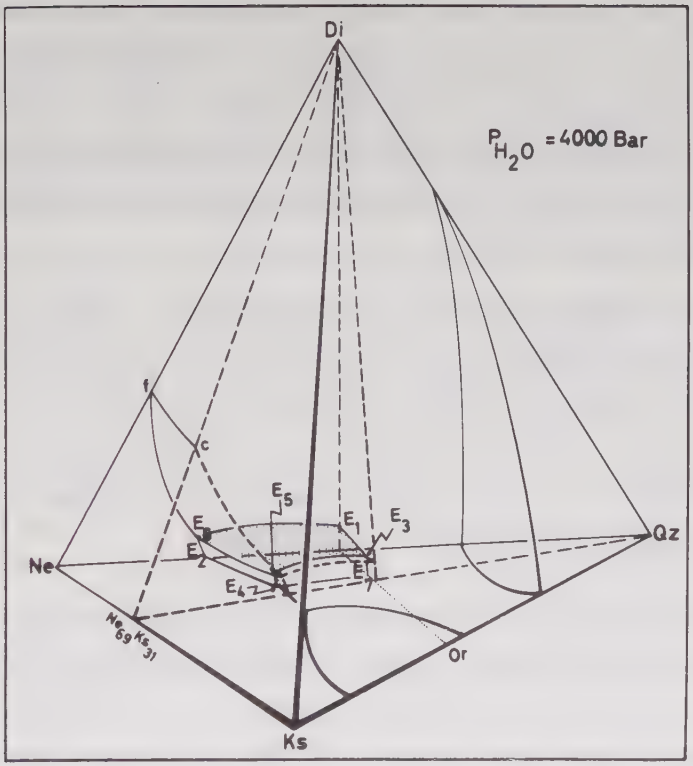

Abb. 9 : Räumliches Modell des Systems Di-Qz-Ne-Ks bei 4 kb H_2O-Druck. H_2O ist stets im Überschuß vorhanden.

dann kristallisiert auch Nephelin-Mischkristall neben Diopsid und Alkalifeldspat aus. Befindet sich der darstellende Punkt der Schmelzzusammensetzung oberhalb der kotektischen Fläche cfE_6P_6, so kristallisiert zunächst Diopsid aus, bis nach Erreichen jener kotektischen Fläche neben Diopsid auch Nephelin-Mischkristall kristallisiert. Als dritte kristalline Phase folgt dann Alkalifeldspat, wenn nach weiterer Temperaturerniedrigung der darstellende Punkt der Schmelzzusammensetzung die kotektische Linie E_6P_6 erreicht hat.

Wenn eine Schmelze Diopsid in so geringen Mengen enthält, daß ihr darstellender Punkt im Alkalifeldspatraum liegt, dann kann nach dem Alkalifeldspat als zweite kristalline Phase entweder Diopsid oder Nephelin-Mischkristall auftreten, je nachdem ob der darstellende Punkt der Schmelzzusammensetzung zuerst die kotektische Fläche $E_1P_1P_6E_6$ oder $E_2P_2P_6E_6$ erreicht.

Aus Abb. 8 geht hervor, daß die kotektische Fläche $E_2P_2P_6E_6$, die den Alkalifeldspatraum vom Nephelin-Mischkristallraum trennt, sich von der kotektischen Linie E_2P_2 im diopsidfreien System Qz-Ne-Ks-H_2O mit einer Neigung zur Di-Ne-Ks-Seite in den Tetraederraum erstreckt. Dieser Effekt wird durch den in der Schmelze gelösten Diopsid verursacht. Die drei kotektischen Flächen schneiden sich in der kotektischen Linie E_6P_6, wobei der Punkt P_6 den piercing point dieser Linie mit der Schnittebene $Di\text{-}Ab_{70}Or_{30}\text{-}Ne_{69}Ks_{31}$ darstellt. Entlang dieser Linie koexistieren drei Kristallarten, nämlich Diopsid, Alkalifeldspat und Nephelin-Mischkristall, die mit einer Schmelze und einer Gasphase im Gleichgewicht stehen. Die auf dieser kotektischen isobaren Linie liegenden Schmelzen haben

ein Verhältnis der Komponenten Alkalifeldspat zu Nephelin-Mischkristall, welches gegenüber kotektischen Schmelzen (E_2 - P_2) des diopsidfreien Systems deutlich zugunsten des Foidanteils verändert ist.

Ein ähnliches aber komplexeres Bild ergeben die Untersuchungen bei 4 und 7 kb H_2O-Druck. In Abb. 9 ist ein räumliches Modell des Systems Di-Qz-Ne-Ks bei 4 kb H_2O-Druck dargestellt. Auf Grund der Mischungslücke von Alkalifeldspäten existieren nun nicht mehr drei, sondern vier kotektische Flächen im SiO_2-untersättigten Teil des Systems. Die vierte kotektische Fläche trennt den Ab-reichen von dem Or-reichen Alkalifeldspatraum. Diese Fläche schneidet die kotektische Linie E_2P_2 (Abb.8) im Punkt E_4, dem ternären Eutektikum im System Ab-Or-Ks-Ne (Abb. 9), und die Linie E_6P_6 (Abb. 8) im Punkt E_5, dem quaternären Eutektikum im System Di-Ab-Or-Ks-Ne (Abb.9). Entlang der kotektischen Linie E_4E_5 herrscht ein Gleichgewicht zwischen einer Schmelze und drei kristallinen Phasen, nämlich einem Ab-reichen Alkalifeldspat, einem Or-reichen Alkalifeldspat und einem Nephelin-MIschkristall in Gegenwart einer Gasphase. Die Versuche im System Di-Ab-Ne-H_2O bei 7 kb haben gezeigt, daß das schmale Analcimfeld zwischen den Kristallisationsfeldern des Ab-reichen Alkalifeldspates und des Foides nur auf das diopsidfreie System Qz-Ne-Ks-H_2O bechränkt bleibt. Im diopsidhaltigen Residualsystem ist die Paragenese Alk.Fsp.(1) + Alk.Fsp.(2) + Ne_{ss} + Di beständig. In Abb. 9 befinden sich außerdem noch zwei Eutektika, E_3 und E_7, die in der Ebene Di-Ab-Or liegen. E_3 ist das ternäre Eutektikum im System Di-Ab-Or und E_7 das binäre Eutektikum zwischen Albit und Orthoklas; da aber hier das größere System Di-Ne-Ks-Qz betrachtet wird, sind die Punkte E_3 und E_7 nicht Eutektika dieses Systems, sondern lediglich piercing points mit der Schnittebene Diopsid - Albit - Orthoklas.

Durch einen Vergleich zwischen den Abbildungen 8 und 9 wird deutlich, daß der Raum des Ab-reichen Alkalifeldspates mit der Druckzunahme von 1 auf 4 kb sich mehr als der Raum des Or-reichen Alkalifeldspates in den Foidraum ausgedehnt hat. Diese Tatsache soll nun von zwei Gesichtspunkten aus betrachtet werden:

1. Der Foidgehalt nimmt vom Eutektikum E_4 zum Eutektikum E_2, also im diopsidfreien System, mit steigendem Druck zu. Während die kotektische Linie zwischen Alkalifeldspat- und Foidfeld im Bereich des Minimums bzw. des Eutektikums mit Druckzunahme von 1 auf 4 kb um 3 Gew.% foidreicher wird, verlagert sich das Eutektikum E_2 zwischen Albit und Nephelin um 15 Gew.% zur Nephelin-Ecke (im Vergleich mit den Daten von EDGAR, 1964, bei 1 kb).

2. Im diopsidhaltigen System kommt der Einfluß des Diopsids dadurch gut zum Ausdruck, daß sich der Punkt E_6 umso mehr zum Nephelin hin verlagert, wenn der Druck zunimmt: Bei 4 kb ist E_6 gegenüber 1 kb 19 Gew.% (im Vergleich mit EDGAR, 1964) nephelinreicher geworden, also noch um 4 Gew.% mehr als E_2 bei gleicher Druckzunahme.

Die Untersuchungen bei 7 kb ergeben ein analoges Bild zu den Untersuchungen bei 4 kb (Abb. 9) mit dem Unterschied, daß die kotektischen Flächen zwischen den Alkalifeldspaträumen und dem Foidraum noch weiter in das Foidfeld verschoben sind. Über die Lage von E_5 und deren Veränderung mit dem Druck können auch ungefähre Angaben gemacht werden (aus den Ergebnissen über P_6 sh. Tab. 4, Seite 32; der Punkt P_6 liegt nämlich sehr nahe dem Eutektikum E_5). E_5 ist deshalb so wichtig im System, weil dort die relativ niedrigsten Temperaturen herrschen und diese Lage bei einer Kristallisationsdifferentiation erreicht werden kann.

VII. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde der Einfluß des Diopsids auf das Kristallisationsverhalten derjenigen Schmelzzusammensetzungen untersucht, deren darstellende Punkte, projiziert auf das diopsidfreie System, in der Nähe der kotektischen Linie Alkalifeldspat/Nephelin$_{ss}$ des SiO_2-ärmeren Teils des Bowenschen Residualsystems liegen.

Für die Experimente sind ein Alkalifeldspat mit dem Komponentenverhältnis $Ab_{70}Or_{30}$, ein Nephelin-Mischkristall der Zusammensetzung $Ne_{69}Ks_{31}$, Hochalbit und Nephelin sowie Diopsid synthetisiert worden. Alle Versuche bei 1, 4 und 7 kb wurden in Hydrothermalapparaturen durchgeführt.

Im ersten experimentellen Teil wurde im diopsidfreien System die Lage der kotektischen Linie Alk.Fsp. + Ne_{ss} + L + V bei 1 kb und die der kotektischen Linien Alk.Fsp.(1) + Ne_{ss} + L + V und Alk.Fsp.(2) + Ne_{ss} + L + V bei 4 und 7 kb bestimmt. Durch die Versuche bei 1 kb (Bestimmung von P_2) ist die Lage der kotektischen Linie Alk.Fsp. + Ne_{ss} + L + V, die von HAMILTON & MACKENZIE (1965) bei 1 kb bestimmt wurde, bestätigt worden; die Liquidustemperaturen jedoch, die hier unter alleiniger Verwendung von kristallinen Substanzen bestimmt worden sind, liegen um 25 bis 30°C über den von HAMILTON & MACKENZIE angegebenen Werten.

Auf Grund der begrenzten Mischkristallbildung der Alkalifeldspäte bei höheren Drucken tritt anstelle des Temperaturminimums auf der kotektischen Linie Alk.Fsp. + Ne_{ss} + L + V ein Eutektikum auf, E_4. Das bedeutet, daß bei höheren Drucken statt eines homogenen Alkalifeldspates zwei Feldspäte mit Nephelin-Mischkristall und der

Schmelze in Gegenwart einer Gasphase im Gleichgewicht stehen. Der Druck, bei dem erstmalig das Minimum durch ein Eutektikum ersetzt wird, wurde experimentell bei 3,1 $\pm$ 0,1 kb festgestellt.

Bei 4 und 7 kb wurde die Lage des Durchstoßpunktes P_2 (Fsp./Foid = 66,25/33,75 bei 4 kb und 62,50/37,50 bei 7 kb) sowie die Lage des binären Eutektikums zwischen Albit und Nephelin, nämlich E_2 - siehe Abb.6 - (Ab/Ne = 58/42 bei 4 kb und 52/48 bei 7 kb), experimentell bestimmt. Der Verlauf der kotektischen Linie Alk.-Fsp.(1) + Ne_{ss} + L + V, die im Punkt E_2, dem binären Eutektikum im System Ab-Ne, anfängt und sich von dort auf der Grundfläche des Tetraeders bis zum ternären Eutektikum E_4 erstreckt (Abb.9), konnte bei den Drucken von 4 und 7 kb interpoliert werden. Der Verlauf der anderen kotektischen Linie Alk.Fsp.(2) + Ne_{ss} + L + V, die sich vom Punkt E_4 über P_2 weiter im K-reicheren Teil des Systems fortsetzt, wurde nur bis zum Punkt P_2 bestimmt.

Im zweiten Teil wurde der Einfluß des Diopsids auf das Bowensche Residualsystem experimentell untersucht. Sein Einfluß besteht in einer Verschiebung der kotektischen Linie zwischen den Kristallisationsfeldern der Alkalifeldspäte und Nephelin-Mischkristall. Mischungen, die aus Alkalifeldspat bzw. Albit, Nephelin-Mischkristall bzw. Nephelin und aus Diopsid bestehen und deren darstellende Punkte in der Nähe der kotektischen Linie Alk.Fsp. + Ne_{ss} + L + V liegen, wurden bei 1, 4 und 7 kb untersucht. Aus diesen Versuchen geht hervor, daß sich von der kotektischen Linie E_2P_2 der Abb. 8 bei 1 kb bzw. E_2E_4 der Abb. 9 bei 4 und 7 kb im diopsidfreien System eine kotektische Fläche $E_2P_2P_6E_6$ bei 1 kb bzw. $E_2E_4E_5E_6$ bei 4 und 7 kb in den Raum des Tetraeders Di-Qz-Ne-Ks in Richtung auf die Seitenflächen Di-Ne-Ks erstreckt (siehe

Abb. 8 und 9). Diese kotektische Fläche schneidet sich bei 4 und 7 kb mit den beiden anderen kotektischen Flächen $E_1E_3E_5E_6$ und fcE_5E_6 in der kotektischen Linie E_6E_5, auf der die drei kristallinen Phasen Alkalifeldspat, Nephelin-Mischkristall und Diopsid zusammen mit Schmelze und Gasphase im Gleichgewicht stehen. Diese isobar univariante kotektische Linie kennzeichnet Schmelzzusammensetzungen, welche deutlich mehr Foid enthalten als die isobar univarianten kotektischen Schmelzzusammensetzungen im diopsidfreien System Qz-Ne-Ks (Vergl. Tabellen 2 und 4).

Somit ist verständlich, daß durch den Prozeß der Kristallisationsdifferentiation sich foidsyenitische Magmen bilden können, welche bis zu 8 % mehr Foid enthalten als auf Grund der bisherigen Kenntnis des diopsidfreien Systems Ab-Or-Ne-Ks-H_2O für möglich gehalten wurde.

Meinem verehrten Lehrer, Herrn Professor Dr. H.G.F. Winkler, habe ich sehr für die Überlassung des Themas, für die stete Diskussionsbereitschaft und auch für die Anregungen und Hinweise, die den Fortgang der Arbeit ganz wesentlich gefördert haben, zu danken.

Mein Dank gebührt auch Herrn Priv.Doz. Dr. B. Storre für wertvolle Diskussionen. Den Mitarbeitern des Mineralogisch-Petrologischen Instituts, die mich bei der Durchführung der experimentellen Arbeit unterstützten, gilt ebenfalls mein Dank, insbesondere Herrn Priv.-Doz. Dr. Nitsch, der mir bei der Auswertung der Experimente behilflich war.

VIII. Literatur

BELL, P.M. & E.H. ROSEBOOM (1969):
Melting relationships of jadeite and albite to 45 kb with comments on the melting behaviour of binary systems at high pressures, in J.J.Papike (ed.), Pyroxenes and Amphiboles: crystal chemistry and phase petrology.- Mineralogical Soc. America Special Paper No. 2, 151-161.

BOWEN, N.L. (1915):
The crystallisation of haplobasaltic, haplodioritic and related magmas.- Am.J. Sci. ser.4, 40, 161-185.

BOWEN, N.L. (1937):
Recent high-temperature research on silicates and its significance in igneous petrology.- Am. Jour. Sci., ser. 5, 33, 1-21.

BOWEN, N.L. (1945):
Phase equilibria bearing on the origin and differentiation of alkaline rocks.- Am.Jour.Sci.,Daly Vol., 75-90.

EDGAR, A.D. (1964):
Phase equilibrium relations on the system nepheline - albite - water at 1.000 kg/cm^2.- Jour.Geol.72,448-460.

EDGAR, A.D. (1964):
Phase equilibrium in the system Di - Ab - Ne - H_2O 1000 kg/cm^2 water pressure.- Am.Miner.49, 573-585

FUDALI, R.F. (1963):
Experimental studies bearing on the origin of pseudo-leucite and associated problems of alkalic rock systems.- Bull.Geol. Soc.Amer. 74, 1101-1126.

GREIG, J.W. & BARTH, T.F.W. (1938):
The system $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$ (nepheline, carnegieite) - $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$ (albite).- Amer.Jour.Sci.35A,93-112

GUPTA, A.K. & LIDIAK, E.G. (1973):
The system diopside - nepheline - leucite.- Contr. Miner. Petr., 41, 231-239.

HAMILTON, D.L. & MACKENZIEE, W.S. (1960):
Nepheline solid solution in the system $NaAlSiO_4$ - $KAlSiO_4$ - SiO_2.- Jour. Petr., I, 57-72.

--- (1965):
Phase equilibrium studies in the system $NaAlSiO_4$ - $KAlSiO_4$ - SiO_2 - H_2O.- Miner. Mag. 34, 214-231.

JOHANNSEN, A. (1938):
A discriptive petrography of igneous rocks.- Chicago.

LUTH, W.C.; JAHN, R.R. & TUTTLE, O.F. (1964):
The granite system at pressures of 4 to 10 kilobars.- J. Geophys. Res. 64, 759-773.

LUTH, W.C. & TUTTLE, O.F. (1966):
The alkalifeldspar solvus in the system Na_2O - K_2O - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O.- Amer. Miner., 51, 1359-1373.

MACKENZIE, W.S. (1954):
The system $NaAlSiO_4$ - $NaAlSi_3O_8$ - H_2O.- Carnegie Inst. Washington, Geophys. Lab.,Yb.53, 119-128.

MACKENZIE, W.S. (1955):
The system $NaAlSiO_4$ - $NaAlSi_3O_8$ - H_2O.- Carnegie Inst. Washington, Geophys. Lab., Yb. 54, 123-132.

MORSE, S.A. (1968):
Syenite.- Ann.Rept. Geophys. Lab., Carnegie Inst. Washington, Yb. 67, 113-120.

MORSE, S.A. (1970):
Alkalifeldspar with water at 5 kilobars.- Jour. Petrol., 11, 221-250.

ORVILLE, Ph. M. (1963):
Alkali-ion exchange between vapor and feldspar phases.- Amer. Jour. Sci., 261, 201-237.

PETERS, Tj., LUTH, W.C. & TUTTLE, O.F. (1966):
The melting of analcite solid solutions in the system $NaAlSiO_4$ - $NaAlSi_3O_8$ - H_2O.-
Amer. Miner., 51, 736-748.

PLATEN, H.v. (1965):
Kristallisation granitischer Schmelzen.-
Contr. Miner. and Petrol. 11, 334-381.

SCHAIRER, W. & BOWEN, N.L. (1938):
Preliminary report on equilibrium relations between feldspatoids, alkali-feldspars, and silica.-
Amer.Geophys.Union Trans., 16th Ann. mtg. 323-328.

SCHAIRER, J.F. (1950):
The alkalifeldspar-join in the system $NaAlSi_3O_8$ - $KAlSi_3O_8$.- Jour. Geol. 58, 512-517.

SCHAIRER, J.F. (1957):
Melting relations of the common rock-forming silicates.-
Amer. ceramic Soc. Jour. 40, 215-236.

SCHAIRER, J.F. & YODER, H.S. (1960):
The nature of residual liquids from crystallisation, with data on the system nepheline - diopside - silica.-
Amer. Jour. Sci., 258A, 273-283.

SECK, H.A. (1971):
Alkalifeldspar - liquid and alkalifeldspar - liquid - vapor relationships at pressure of 5 and 10 kilobars.-
N.Jb.Miner. Abh. 115, 2, 140-163.

SOOD, M.K.; PLATT, R.G. & EDGAR, A.D. (1970):
Phase relation in portions of the system diopside - nepheline - kalsilite - silica and their importance in the genesis of alkaline rocks.-
Canadian Miner. 10, 380-393.

STRECKEISEN, A. (1967):
Classification and nomenclature of igneous rocks.-
N.Jb.Miner., Abh. 107, 144-240.

STRECKEISEN, A. (1973):
Classification and nomenclature of plutonic rocks. Recommendations.- N.Jb.Miner. Mh. 1973, H.4,149-164.

THOMPSON, J. & WALDBAUM (1969):
Mixing properties of sanidine crystaline solutions, III. calculations based on two phase data.- Amer. Miner., 54, 811-838.

TUTTLE, O.F. & BOWEN, N.L. (1950):
High temperature albite and contiguous feldspars.- Jour. Geol., 58, 572-584.

TUTTLE, O.F. & BOWEN, N.L. (1958):
Origin of granite in the light of experimental studies in the system $NaAlSi_3O_8$ - $KAlSi_3O_8$ - SiO_2 - H_2O.- Geol. Soc. Amer., Mem. 74.

TUTTLE, O.F. & SMITH (1957):
Nepheline - kalsilite - system.- Amer. Jour. Sci., 255, 282-305.

WATT, (1966):
Chemical analyses from the igneous province, South Greenland.- Grønlands Geol. Undersogelse Rept.6.

WINKLER, H.G.F. (1967):
Petrogenesis of Metamorphic Rocks, 2th ed., Springer-Verlag New York.

Petrogenesis of Metamorphic Rocks, 3rd ed., Springer-Verlag New York (1974).

WINKLER, H.G.F. & LINDEMANN, W. (1972):
The system Qz-Or-An-H_2O within the granitic system Qz-Or-Ab-An-H_2O. Application to granitic magma formation.- N.Jb.Miner. Mh., H.2, 49-61.

Tabelle 1A Versuchsergebnisse der Mischungen S I bis S VII bei 4000 Bar H_2O-Druck zur Bestimmung der Lage des Eutektikums E_2 im System Ab-Ne.

Sämtliche Versuche wurden in 10 mm langen Proben durchgeführt.

Proben-Nr.	Ausgangs-mischung	Temp. (°C)	Dauer (Tage)	Ergebnis Fsp.	Ne	S
21	S I	678	7	+	+	-
51	S I	688	6	+	+	+
31	S I	694	7	+	+	+
11	S I	701	5	+	-	+
61	S I	710	4	+	-	+
22	S II	678	7	+	+	-
52	S II	688	6	+	+	+
32	S II	694	7	+	+	+
12	S II	701	5	+	-	+
62	S II	710	4	+	-	+
23	S III	678	7	+	+	-
53	S III	688	6	+	+	+
33	S III	694	7	+	+	+
13	S III	701	5	+	-	+
63	S III	710	4	+	-	+
24	S IV	678	7	+	+	-
54	S IV	688	6	+	+	+
34	S IV	694	7	+	+	+
14	S IV	701	5	+	-	+
64	S IV	710	4	+	-	+

Tabelle IA / Fortsetzung

Proben-Nr.	Ausgangs-mischung	Temp. (°C)	Dauer Tage	Ergebnis Fsp.	Ne	S
121	S V	680	3	+	+	-
91	S V	690	4	+	+	+
81	S V	695	2	+	+	+
111	S V	700	7	+	+	+
101	S V	705	4	+	-	+
71	S V	710	5	+	-	+
122	S VI	680	3	+	+	-
92	S VI	690	4	+	+	+
82	S VI	695	2	+	+	+
112	S VI	700	7	+	+	+
102	S VI	705	4	-	-	+
72	S VI	710	5	-	-	+
123	S VII	680	3	+	+	-
93	S VII	690	4	+	+	+
83	S VII	695	2	+	+	+
113	S VII	700	7	+	+	+
103	S VII	705	4	-	+	+
73	S VII	710	5	-	+	+

Tabelle 2A Versuchsergebnisse der Mischungen S_{VIII} bis S_{XI} bei 7000 Bar H_2O-Druck zur Bestimmung der Lage des Eutektikums E_2 im System Ab-Anl.

Proben-Nr.	Ausgangs-mischung	Temp. (°C)	Dauer (Tage)	Ergebnis Ab	Ne	Anl	S
71	S_{VIII}	625	10	+	+	+	-
51	S_{VIII}	635	3	+	+	+	+
41	S_{VIII}	645	3	+	+	+	+
61	S_{VIII}	650	4	+	-	+	+
31	S_{VIII}	655	4	-	-	-	+
72	S_{IX}	625	10	+	+	+	-
52	S_{IX}	635	3	+	+	+	+
42	S_{IX}	645	3	+	+	+	+
62	S_{IX}	650	4	+	+	+	+
32	S_{IX}	655	4	-	+	-	+
22	S_{IX}	665	7	-	-	-	+
73	S_X	625	10	+	+	+	-
53	S_X	635	3	+	+	+	+
43	S_X	645	3	+	+	+	+
63	S_X	650	4	+	+	+	+
33	S_X	655	4	-	+	-	+
23	S_X	665	7	-	+	-	+
74	S_{XI}	625	10	+	+	+	-
54	S_{XI}	635	3	+	+	+	+
44	S_{XI}	645	3	+	+	+	+
64	S_{XI}	650	4	+	+	+	+
34	S_{XI}	655	4	-	+	-	+
24	S_{XI}	665	7	-	+	-	+

Tabelle 3A Versuchsergebnisse der Mischungen, I, II und III bei 1000 Bar H_2O-Druck.

Proben Nr.	Ausgangs mischung	Temp. (°C)	Dauer (Tage)	Ergebnis Fsp.	Ne	S
801	I	770	7	+	+	-
781	I	775	9	+	+	+
791	I	780	7	+	+	+
771	I	785	9	+	+	+
831	I	790	2	+	+	+
761	I	795	3	+	-	+
841	I	800	4	-	-	+
741	I	805	7	-	-	+
802	II	770	7	+	+	-
782	II	775	9	+	+	+
792	II	780	7	+	+	+
772	II	785	9	+	+	+
832	II	790	2	+	+	+
762	II	795	3	+	+	+
842	II	800	4	-	+	+
742	II	805	7	-	-	+
803	III	770	7	+	+	-
793	III	780	7	+	+	+
833	III	790	2	+	+	+
843	III	800	4	-	+	+
863	III	805	7	-	+	+

Tabelle 4A Versuchsergebnisse der Mischungen II, III und IV bei 4000 Bar H_2O-Druck zur Bestimmung der Lage von P_2.

Die Anwesenheit von zwei Feldspäten wurde in dieser Tabelle und in der Tabelle 3A nicht berücksichtigt. Die Bestimmung der Zusammensetzung der Feldspäte war wegen der geringen Menge des vorhandenen kristallinen Anteils nicht möglich. Die Zusammensetzung des Alkalifeldspates, der in Gegenwart einer Schmelze und einer Gasphase mit Nephelin-Mischkristall im Gleichgewicht steht, ist jedoch auf Grund der bestimmten Lage des Eutektikums in diesem Teil des Systems K-reicher geworden.

Proben-Nr.	Ausgangs-mischung	Temp. (°C)	Dauer (Tage)	Ergebnis Fsp.	Ne	S
21	II	650	6	+	+	-
31	II	660	7	+	+	+
41	II	670	7	+	+	+
51	II	675	7	? +	? +	+
11	II	680	6	-	-	+
22	III	650	6	+	+	-
32	III	660	7	+	+	+
42	III	670	7	+	+	+
52	III	675	7	? +	+	+
12	III	680	6	-	+	+
23	IV	650	6	+	+	-
33	IV	660	7	+	+	+
43	IV	670	7	+	+	+
53	IV	675	7	? +	+	+
13	IV	680	6	-	+	+

Tabelle 5A Versuchsergebnisse der Mischungen II, III und IV bei 7000 Bar H_2O-Druck zur Bestimmung der Lage von P_2.

Proben-Nr.	Ausgangs-mischung	Temp. (°C)	Dauer (Tage)	Ergebnis Fsp.	Ne	S
41	II	609	7	+	+	-
61	II	612	20	+	+	-
51	II	618	7	+	+	-
31	II	623	7	+	+	+
11	II	640	7	+	+	+
21	II	650	10	+	-	+
42	III	609	7	+	+	-
62	III	612	20	+	+	-
52	III	618	7	+	+	-
32	III	623	7	+	+	+
12	III	640	7	+	+	+
22	III	650	10	-	-	+
43	IV	609	7	+	+	-
63	IV	612	20	+	+	-
53	IV	618	7	+	+	-
33	IV	623	7	+	+	+
13	IV	640	7	+	+	+
23	IV	650	10	-	+	+

Tabelle 6A Versuchsergebnisse der Mischungen MS_1 bis MS_{VII} zur Bestimmung der Lage des Durchstoßpunktes E_6 bei 4000 Bar H_2O-Druck.

Proben Nr.	Ausgangs mischung	Temp. (°C)	Dauer (Tage)	Ergebnis Ab	Ne	Di	S
81	MS_I	680	10	+	+	+	-
71	MS_I	690	6	+	+	+	+
61	MS_I	700	6	+	+	+	+
21	MS_I	730	7	+	-	+	+
51	MS_I	740	4	+	-	+	+
101	MS_I	750	4	+	-	-	+
121	MS_I	760	4	-	-	-	+
82	MS_{II}	680	10	+	+	+	-
72	MS_{II}	690	6	+	+	+	+
62	MS_{II}	700	6	+	+	+	+
22	MS_{II}	730	7	+	-	+	+
52	MS_{II}	740	4	+	-	+	+
102	MS_{II}	750	4	+	-	-	+
122	MS_{II}	760	4	-	-	-	+
83	MS_{III}	680	10	+	+	+	-
73	MS_{III}	690	6	+	+	+	+
63	MS_{III}	700	6	+	+	+	+
23	MS_{III}	730	7	+	-	+	+
53	MS_{III}	740	4	-	-	-	+
84	MS_{IV}	680	10	+	+	+	-
74	MS_{IV}	690	6	+	+	+	+
64	MS_{IV}	700	6	+	+	+	+
24	MS_{IV}	730	7	+	-	+	+
54	MS_{IV}	740	4	+	-	+	+

Tabelle 6A / Fortsetzung

Proben Nr.	Ausgangs-mischung	Temp. (°C)	Dauer (Tage)	Ergebnis Ab	Ne	Di	S
91	MS_{IV}	750	1	? +	-	+	+
123	MS_{IV}	760	4	-	-	+	+
85	MS_{V}	680	10	+	+	+	-
75	MS_{V}	690	6	+	+	+	+
65	MS_{V}	700	6	+	+	+	+
31	MS_{V}	730	4	+	-	+	+
55	MS_{V}	740	4	+	-	+	+
92	MS_{V}	750	1	-	-	+	+
86	MS_{VI}	680	10	+	+	+	-
76	MS_{VI}	690	6	+	+	+	+
66	MS_{VI}	700	6	+	+	+	+
32	MS_{VI}	730	4	+	+	+	+
56	MS_{VI}	740	4	-	-	+	+
93	MS_{VI}	750	1	-	-	+	+
87	MS_{VII}	680	10	+	+	+	-
77	MS_{VII}	690	6	+	+	+	+
67	MS_{VII}	700	6	+	+	+	+
33	MS_{VII}	730	4	-	+	+	+
57	MS_{VII}	740	4	-	+	+	+
94	MS_{VII}	750	1	-	-	+	+

Tabelle 7A Versuchsergebnisse der Mischungen M_{VII} bis MS_{XIV} zur Bestimmung der Lage des Durchstoßpunktes E_6 bei 7000 Bar H_2O-Druck.

Proben Nr.	Ausgangsmischung	Temp. (°C)	Dauer (Tage)	Ergebnis Ab	Ne	Di	S
61	MS_{VII}	670	6	+	+	+	-
11	MS_{VII}	680	3	+	+	+	+
21	MS_{VII}	690	5	+	+	+	+
31	MS_{VII}	700	3	+	+	+	+
41	MS_{VII}	710	6	+	-	-	+
51	MS_{VII}	720	2	+	-	-	+
62	MS_{VIII}	670	6	+	+	+	-
12	MS_{VIII}	680	3	+	+	+	+
22	MS_{VIII}	690	5	+	+	+	+
32	MS_{VIII}	700	3	+	-	+	+
42	MS_{VIII}	710	6	+	-	-	+
52	MS_{VIII}	720	2	+	-	-	+
63	MS_{IX}	670	6	+	+	+	-
13	MS_{IX}	680	3	+	+	+	+
23	MS_{IX}	690	5	+	+	+	+
33	MS_{IX}	700	3	+	-	+	+
43	MS_{IX}	710	6	+	-	-	+
53	MS_{IX}	720	2	+	-	-	+
64	MS_{X}	670	6	+	+	+	-
14	MS_{X}	680	3	+	+	+	+
24	MS_{X}	690	5	+	+?	+	+
34	MS_{X}	700	3	+?	-	+	+
44	MS_{X}	710	6	-	-	+	+
54	MS_{X}	720	2	-	-	+	+

Tabelle 7A / Fortsetzung

Proben Nr.	Ausgangs-mischung	Temp. (°C)	Dauer (Tage)	Ergebnis Ab	Ne	Di	S
101	MS_{XI}	650	4	+	+	+	-
71	MS_{XI}	660	8	+	+	+	+
81	MS_{XI}	670	4	+	-	-	+
91	MS_{XI}	680	5	-	-	-	+
102	MS_{XII}	650	4	+	+	+	-
72	MS_{XII}	660	9	+	+	+	+
82	MS_{XII}	670	4	+	-	-	+
92	MS_{XII}	680	5	-	-	-	+
103	MS_{XIII}	650	4	+	+	+	-
73	MS_{XIII}	660	9	+	+	+	+
83	MS_{XIII}	670	4	-	+	-	+
93	MS_{XIII}	680	5	-	-	-	+
104	MS_{XIV}	650	4	+	+	+	-
74	MS_{XIV}	660	9	+	+	+	+
84	MS_{XIV}	670	4	-	+	-	+
94	MS_{XIV}	680	5	-	+	-	+

Tabelle 8A Versuchsergebnisse der Mischungen M_{II} und M_{III} bei 1000 Bar H_2O-Druck zur Bestimmung der Lage des Durchstoßpunktes P_6.

Proben Nr.	Ausgangs-mischung	Temp. (°C)	Dauer (Tage)	Ergebnis Fsp.	Ne	Di	S
891	M_{II}	730	5	+	+	+	-
881	M_{II}	750	5	+	+	+	-
871	M_{II}	760	5	+	+	+	-
921	M_{II}	770	5	+	+	+	+
911	M_{II}	780	5	+	+	+	+
901	M_{II}	790	5	+	+	+	+
931	M_{II}	795	4	+	+	+	+
941	M_{II}	800	4	+	+	+	+
951	M_{II}	805	4	+	+	+	+
961	M_{II}	810	4	+	-	+	+
971	M_{II}	815	4	?	-	+	+
892	M_{III}	730	5	+	+	+	-
882	M_{III}	750	5	+	+	+	-
872	M_{III}	760	5	+	+	+	-
922	M_{III}	770	5	+	+	+	+
912	M_{III}	780	5	+	+	+	+
902	M_{III}	790	5	+	+	+	+
932	M_{III}	795	4	+	+	+	+
942	M_{III}	800	4	? +	+	+	+
952	M_{III}	805	4	-	+	+	+
962	M_{III}	810	4	-	+	+	+
972	M_{III}	815	4	-	+	+	+

Tabelle 9A Versuchsergebnisse der Mischungen M_{III}, M_{IV} und M_V bei 4000 Bar H_2O-Druck zur Bestimmung der Lage des Durchstoßpunktes P_6.

Proben-Nr.	Ausgangsmischung	Temp. (°C)	Dauer (Tage)	Ergebnis Fsp.	Ne	Di	S
041	M_{III}	660	7	+	+	+	+
051	M_{III}	670	7	+	+	+	+
031	M_{III}	680	7	+	+	+	+
021	M_{III}	690	4	+	-	+	+
991	M_{III}	700	4	?	-	+	+
011	M_{III}	710	4	-	-	+	+
001	M_{III}	720	4	-	-	+	+
981	M_{III}	740	4	-	-	+	+
042	M_{IV}	660	7	+	+	+	+
052	M_{IV}	670	7	+	+	+	+
032	M_{IV}	680	7	+	+	+	+
022	M_{IV}	690	4	-	+	+	+
992	M_{IV}	700	4	-	+	+	+
012	M_{IV}	710	4	-	-	+	+
002	M_{IV}	720	4	-	-	+	+
982	M_{IV}	740	4	-	-	+	+
043	M_V	660	7	+	+	+	+
053	M_V	670	7	+	+	+	+
033	M_V	680	7	+	+	+	+
023	M_V	690	4	+	+	+	+
993	M_V	700	4	-	+	+	+
013	M_V	710	4	-	+	+	+
003	M_V	720	4	-	?	+	+
983	M_V	740	4	-	-	+	+

Tabelle 10A Versuchsergebnisse der Mischungen M_{IV}, M_V und M_{VI} zur Bestimmung der Lage des Durchstoßpunktes P_6 bei 7000 Bar H_2O-Druck.

Proben-Nr.	Ausgangs-mischung	Temp. (°C)	Dauer (Tage)	Ergebnis Fsp.	Ne	Di	S
11	M_{IV}	640	5	+	+	+	+
91	M_{IV}	655	6	+	-	+	+
81	M_{IV}	662	10	-	-	+	+
71	M_{IV}	665	10	-	-	+	+
61	M_{IV}	675	7	-	-	+	+
41	M_{IV}	690	7	-	-	+	+
12	M_V	640	5	+	+	+	+
92	M_V	655	6	?	+	+	+
82	M_V	662	10	-	+	+	+
72	M_V	665	10	-	+	+	+
62	M_V	675	7	-	-	+	+
42	M_V	690	7	-	-	+	+
13	M_{VI}	640	5	+	+	+	+
93	M_{VI}	655	6	-	+	+	+
83	M_{VI}	662	10	-	+	+	+
73	M_{VI}	665	10	-	+	+	+
63	M_{VI}	675	7	-	+	+	+
43	M_{VI}	690	7	-	-	+	+

L E B E N S L A U F

Am 27. April 1946 wurde ich als 5. Kind des Beamten Fatulah Fattahi und seiner Ehefrau Fatemeh, geb. Hakimi, in Teheran/Iran geboren.

Von meinem 6. Lebensjahr an besuchte ich die Volksschule Daghighi, die ich im Jahre 1958 mit der Abschlußprüfung beendete. Im gleichen Jahr wurde ich Schüler der Oberschule Amirkabir und verließ diese Schule im Jahre 1961 mit dem Abschlußzeugnis der 9. Klasse. Ab der 10. Klasse besuchte ich die private Oberschule Sokhan in Teheran, die ich nach der 12. Klasse mit dem Diplom (hier Abitur) des mathematischen Zweiges und einer Auszeichnung als bester Schüler der Schule verließ.

Am 13. März 1965 kam ich in die BRD. Im Oktober 1965 besuchte ich das für ausländische Studierende vorgesehene Studienkolleg in Hannover, dessen Dauer auf 1 Jahr festgelegt ist. Nach sechs Monaten konnte ich jedoch auf Grund einer sehr guten Semesterleistung die Abschlußprüfung vorzeitig mit der Note "gut" ablegen.

Zum Sommersemester 1966 immatrikulierte ich mich an der Georg-August-Universität zu Göttingen, um Mineralogie zu studieren. Die Diplom-Vorprüfung in Mineralogie bestand ich am 22. April 1969 mit der Note "gut" und begann nach einem Semester, die Vorbereitungen für die Anfertigung einer experimentellen Arbeit mit dem Titel "Der Einfluß des Diopsids auf das BOWEN'sche Residualsystem" im Mineralog._Petrolog. Institut der Universität Göttingen zu treffen. Diese Arbeit wurde unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. H.G.F. WINKLER im Sommersemester 1972 fertiggestellt. Am Anfang des Wintersemesters 1972/73 legte ich dann die Diplom-Hauptprüfung in Mineralogie mit der Note "gut" ab.

Bönecke-Druck 3392-Clausthal-Z. 29